

Применение моделей напряженной целостности (tensegrity-модели) для описания биомеханики позвоночника

А.М.Орел, Кафедра мануальной терапии ФППОВ ММА им. И.М.Сеченова,

В статье описаны происхождение термина, основные свойства и модели напряженной целостности. Представлены возможности применения моделей напряженной целостности для описания функционирования позвоночника в норме и при дегенеративно-дистрофических заболеваниях.

Ключевые слова: напряженная целостность (tensegrity), модели напряженной целостности, позвоночник, дегенеративно-дистрофические заболевания позвоночника

Сегодня в мануальной медицине всё шире используется понятие напряженной целостности (tensegrity). Интерес к данному аспекту помимо прочего обусловлен самим термином, ставшим визитной карточкой знаменитых романов Карлоса Кастанеды. Термин часто встречается в отечественных и зарубежных публикациях остеопатов и мануальных терапевтов. В силу этого представляется актуальным подробнее рассмотреть само понятие и модели напряженной целостности. Второй задачей стало описать с помощью моделей напряженной целостности позвоночник человека. Наконец, в-третьих, сделана попытка описать возникновение дегенеративно-дистрофических заболеваний позвоночника с точки зрения срыва адаптационных механизмов напряженной целостности на уровне всего позвоночника одновременно.

Проблема создания самовосстанавливающейся конструкции, впервые была разрешена в 20-х годах прошлого века известным американским ученым, дизайнером и архитектором Ричардом Бакминстером Фуллером. Он разработал концепцию, «напряженной целостности» или «tensegrity».

В первоначальном авторском понимании напряженная целостность — это «свойство каркасных структур, работающих на натяжение, и составных деталей, работающих на сжатие, таким образом, что каждая деталь функционирует с максимальной эффективностью и экономичностью»

[Fuller, R.B.; Applewhite, E.J., 1975]. В результате их функционального единства любое возмущающее воздействие извне мгновенно передается на все элементы системы.

Для описания такой структуры был предложен специальный термин. Он составлен из 2-х слов: tension (натяжение, напряжение) и integrity (целостность). Их сложение и дало широко известный сегодня термин «tensegrity» [Википедия].

Р.Б.Фуллер (R.B Fuller) описал основные свойства напряженной целостности.

Напряженную целостность составляют относительно небольшие участки компрессии или жесткие структуры (прерывистые элементы сжатия) и протяженные, непрерывные эластично-прочные структуры в виде тяг, кабелей или веревок. Баланс между напряженными и сжимающими силами создает стабильность всей системы.

1. Напряженная целостность действует, как полноценная система. Любые внешние силы передаются ко всем элементам её структуры одинаково, заставляя симметрично изменяться, но не разрушаться.
2. Вибрация из одной части структуры напряженной целостности передается ко всем другим частям.
3. Напряженная целостность демонстрирует совместные действия всех элементов (синергию), при этом результирующий эффект этих действий существенно превосходит действия каждого отдельно

взятого компонента, также как и эффект простого суммирования их эффектов.

4. Существование напряженной целостности возможно только в случае, когда в ней имеется пред-напряжение, представляющее собой изначальное взаимодействие элементов системы, поддерживающее её в рабочем состоянии и определяющее её форму и скорость ответа на внешнее возмущение. Нередко структура треугольной формы, заложенная в строении напряженной целостности, является определяющей для поддержания её устойчивости.

5. Напряженная целостность обладает свойством самостабилизирующейся системы, мгновенно восстанавливающей свою форму и функциональные качества при прекращении действия внешних возмущающих сил.

6. Разнообразие моделей напряженной целостности обусловлено множественностью форм и природой соединений сжимающихся и натягивающихся элементов. Это могут быть симметрично или асимметрично сферические формы, пневматические или гидростатические системы, и даже атом или Солнечная система [Орел А.М., 2009, Parsons J., Mercer N., 2005].

Р.Б.Фуллер (R.B Fuller), утверждал, что все существующее материальные объекты от атомарных частиц, живых существ и до звезд солнечной системы обладают свойствами напряженной целостности.

Повреждение структур напряженной целостности

Ограничения действия структур напряженной целостности состоят в том, что свободное и равномерное распределение механических сил в

таких системах может осуществляться только в том случае, если эти системы абсолютно свободны и функционируют без задержек и отклонений. При этом реализация целенаправленного движения происходит симметрично и равномерно в соответствии с законами функционирования моделей напряженной целостности. В случае, когда даже один элемент системы повреждается и переходит в состояние дисфункции, это нарушит работу всей целостности. Этот элемент, порождает ряд компенсаторных и адаптационных реакций со стороны всего организма. Приобретая всё большую устойчивость, он формирует новую точку опоры для натягивающихся структур, и начинает играть роль рычага, дестабилизируя функционирование всей системы. По сути, в систему напряженной целостности вводятся дополнительные рычаги или точки компрессии, и она, с учетом этого обстоятельства, приобретает свойства новой, энергозатратной системы, функционирующей по законам ньютоновской механики [Parsons J., Mercer N., 2005].

Но на этом процесс не останавливается. Число элементов, работающих дисфункционально растёт, что резко затрудняет и ограничивает распределение силовых нагрузок, вплоть до возникновения условий, когда локальные слабые звенья разрушаются, образуя целый каскад изменений, все более и более ограничивающих подвижность системы, обуславливая новые и новые повреждения. Поэтому не случайно, что дегенеративно-дистрофические изменения в позвоночнике не диагностируются как отдельные феномены, а всегда в виде нескольких форм, существующих одновременно.

Модели напряженной целостности

Описанные принципы воплощаются в виде нескольких характерных моделей напряженной целостности, каждая из которых в наибольшей степени приспособлена для выполнения определенной механической задачи.

Модель «палок и веревок»

Это первая модель, которая реализовала принцип напряженной целостности. Ее построил ученик Р.Б.Фуллера Кеннет Снельсон. Она

представляет собой систему рычагов, роль которых исполняют множество жестких стержней, и тяг, состоящих из большого числа длинных кабелей или веревок (рис. 1а) [Snelson K. <http://www.kennethsnelson.net/icons/comp.htm>].

Жесткие стержни действуют как распорки (рычаги) и являются элементами компрессии. Кабели или веревки играют роль длинных тяг объединяющих всю конструкцию в единое целое. Даже соединенные вместе, эти элементы еще не представляют собой напряженную целостность, до тех пор, пока внутри системы не появится небольшая сила натяжения или напряжения, заставляющая рычаги подняться, а тяги удерживать это пространственное положение структур. Слабое натяжение только слегка образует геометрическую форму объекта, а внесённое возмущение легко выводит ее из равновесия. По мере усиления натяжения, повышения напряженности тяг и распорок (рычагов), система в целом становится более устойчивой. Она менее способна значительно деформироваться при действии повреждающих внешних сил, а ответ на это воздействие наступает намного быстрее. Данная характеристика получила особое название «преднапряжение».

Прочность модели зависит от степени преднапряжения, которую она может выдержать. Поэтому, исследуя расположение распорок, степень сокращаемости и эластичности натянутых веревок, можно сказать насколько эта система способна выдерживать нагрузки.

Примером модели рычагов и тяг может служить палатка, состоящая из двух изогнутых, пересекающихся на вершине жестких полых трубок, вдеваемых в непромокаемую ткань, которая при этом жестко натягивается. В результате получается очень прочная и легкая конструкция, устойчивая для любых внешних воздействий. Достаточно слегка натянуть палатку, а сделать это нелегко, поскольку все ее структуры будут сопротивляться воздействию, и затем отпустить, ее форма восстановится мгновенно, демонстрируя свойства самостабилизирующейся системы [Parsons J., Mercer N., 2005].

Модель «воздушный шар»

Модель воздушного шара также дает нам пример напряженной целостности (рис. 1б). Если мгновенную компрессию представить в виде единичного толчка, то натяжение резиновой оболочки воздушного шара под воздействием постоянно ударяющих в него молекул воздуха, тоже представляет собой напряженную целостность. Любая внешняя сила, приложенная к воздушному шару, мгновенно распределяется по всему объему. Если заменить воздух жидкостью ситуация не изменится, сохраняя основные свойства этой системы [Parsons J., Mercer N., 2005].

Модель «колесо велосипеда»

Еще одна модель, демонстрирующая свойства напряженной целостности — это модель велосипедного колеса (рис. 1в). Её отличие заключается в том, что элементами натяжения служат спицы, они передают силы тяжести от седока и остова велосипеда ко всей оправе колеса, составляющей элемент компрессии.

Эта модель представляет удобный пример для демонстрации отличий механики гравитационных сил от механики напряженной целостности. S.M.Levin показал, что в колесе фургона, в соответствии с действием сил тяжести, вес фургона давит на ось, которая сжимает центр, что передается на оправу колеса. Поэтому при изменении момента сил, действующих на колесо со стороны фургона или со стороны опоры колеса на ось, могут создаться условия, когда прочностные свойства оси не выдерживают, и она сломается. В механике колеса велосипеда, существуют линии постоянного натяжения — спицы. Они формируют сеть напряженности всей структуры колеса, которая мгновенно распределяет возникающую в центре компрессию на остальные спицы и весь обод. Центр колеса оказывается, приостановлен, как бы висит в воздухе. Вес седока и рамы велосипеда оказывает давление на его центр, однако в каждый момент времени это давление мгновенно передается на все остальные элементы колеса велосипеда, равномерно распределяясь по его ободу. Поэтому оправа колеса играет роль компримирующего элемента, а

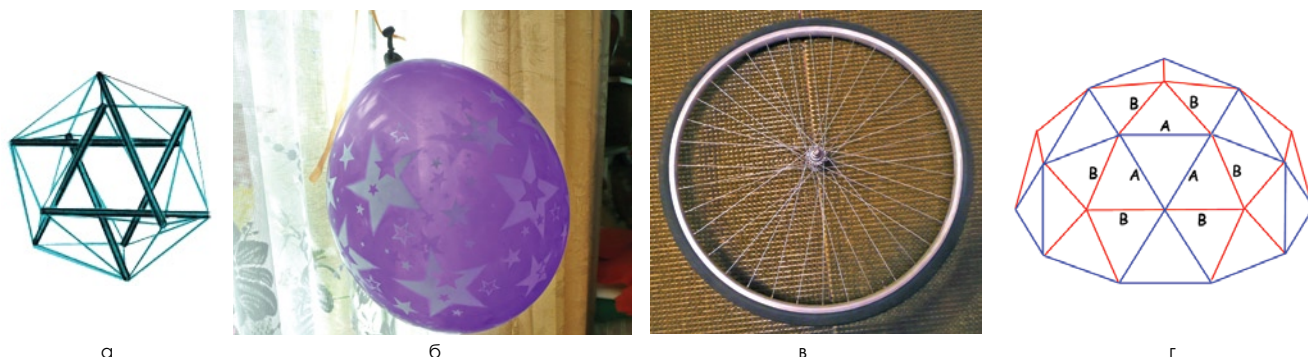


Рис. 1 Модели напряженной целостности
а) модель «палок и веревок»; б) модель «воздушного шара»; в) модель «велосипедного колеса»; г) модель «геодезического купола»

спицы — роль линий натяжения, причем в каждое мгновение это отдельно взятое сжатие распределяется на всю структуру напряженной целостности [Levin SM. www.biotensegrity.com].

Примером данной модели в природе служит Солнечная система, где Солнце действует как центр колеса, а роль спиц играют силы гравитационного притяжения планет. Аналогично можно представить модель атома. В нём ядро — это центр, а электроны, движущиеся вокруг, удерживаются притяжением к ядру [Parsons J., Marcer N., 2005].

Модель «геодезического купола»

Данная модель напряженной целостности представляет собой более сложный случай. Она демонстрирует самую экономичную связь взаимодействующих между собой структур — линию, натягивающуюся между двумя точками. Эти элементы собираются между собой в треугольники, и способны покрыть, разнообразные по форме и размерам плоскостные образования, например, симметричный шаровой геодезический купол, сигару цепеплина или кожу целого слона [Fuller, R.B.; Applewhite, E.J.; 1975]. Каждый элемент модели геодезического купола в зависимости от обстоятельств и направления прилагаемой силы способен попеременно проявлять свойства как растяжимого, так и сжимаемого элемента. То есть, кратчайшее соединение между точками позволяет областям натяжения и компрессии постоянно меняться местами. При этом для стабильности они не требуют прямого контакта между всеми сжимающимися элементами. Любая структура, разбитая на треугольники, способна мгновенно распределить прилагаемое

внешнее усилие на все точки во всех направлениях, прогрессивно распространяясь по всей модели [Parsons J., Marcer N., 2005].

В отличие от гравитационной модели И.Ньютона, в которой распределение сил действует вдоль вертикальной продольной оси, модель напряженной целостности «рассматривает кости скелета как прерывистые компоненты сжатия, подвешенные или колеблющиеся в пределах непрерывной мягкой сети напряженной ткани» [Parsons J., Marcer N., 2005]. И это действительно так, поскольку мягкая и упругая фасциальная система человеческого тела окутывает его по всей поверхности, проникает во все полости, формирует оболочки органов, поддерживая системные органы и места опоры — кости. Это дало повод представить человека в виде резиновой палатки, где кожа — это резиновая ткань палатки, а кости скелета — столбы, на которых она натягивается и которые она поддерживает [Stone C., 1999].

Применение моделей напряженной целостности

Применение моделей напряженной целостности для объяснения функционирования тела человека зависит от выполняемой данным элементом функции. Для осуществления больших двигательных актов, перемещения грузов на расстояние, там, где требуется механический выигрыш сил, наиболее адекватна модель рычагов и веревок. С функцией поддержки объема, удержания целостности в преднапряжении отлично справляется модель воздушного шара. Многократное повторение движений, длительное существование однотипных движений

легче всего обеспечивается в рамках модели велосипедного колеса. И, наконец, интеграцию различных по форме и структуре элементов способна провести модель геодезического купола.

Даже взятая в отдельности, каждая модель способна прекрасно справиться с предназначенной ей функциональной задачей, однако, комбинирование и взаимодействие различных моделей способно привести к появлению качественно новых свойств, характерных для целостной системы. Этим можно объяснить длительное существование организма в условиях неблагоприятной физической и биомеханической нагрузки, практически без каких-либо видимых отрицательных последствий. Концепция напряженной целостности предлагает логичное и последовательное объяснение, почему изменения, возникшие в одной части тела человека, будут иметь свои продолжения и последствия в других, и нередко достаточно отдаленных, частях. Присутствием механизмов, подобных моделям напряженной целостности можно объяснить эффективность самовосстановления организма после травм и заболеваний. Более того, если проследить механическую составляющую развития и изменения тела человека, начиная с момента оплодотворения и до смерти, мы постоянно будем сталкиваться с необходимостью рассмотреть появление, рост, иерархию взаимоотношений и угасание различных моделей напряженной целостности [Орел А.М., 2009].

Продолжение читайте в следующем номере МА «Больница».

