

**Д.В.БРЕСЛАВСКИЙ**, докт.техн.наук; **В.Н.КОНКИН**, канд.техн.наук;  
**В.Г.СУКИАСОВ**, канд.техн.наук; НТУ «ХПИ»;  
**Б.А.ПУСТОВОЙТ**, докт.мед.наук; **БАХА В.Ф. ЯХЬЯ**, Институт  
патологии позвоночника и суставов им. М.И.Ситенко АМН Украины

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ БОЛЬШОЙ БЕРЦОВОЙ КОСТИ И ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ФРОНТАЛЬНОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА ЕЕ НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ**

Розглянуто задачу статичного аналізу великої гомілкової кістки під дією фізіологічного навантаження. На базі скінченноелементних розрахунків тривимірних моделей проведено зіставлення напруженого стану здорової та закривленої кісток. Показано, що наявність фронтальної деформації призводить до значного підвищення рівня навантаженості кістки.

The problem of the tibia static analysis under action of physiological loading is considered. The comparison of stress state of the healthy and curved bones is carried out by finite element computation of three-dimensional models. It is shown, that presence of face-to-face deformation results in significant increase of bones loading level.

Актуальними проблемами в современной хирургии можно считать фронтальные деформации нижних конечностей. К ним относятся О-образная или варусная и Х-образная или вальгусная деформации. В норме механическая ось нижних конечностей проходит через центры тазобедренного, коленного и голеностопного суставов. В случае фронтальной деформации ось смещается на внутренний (варус) либо на наружный (вальгус) отделы коленного сустава, что со временем приводит к его разрушению вследствие перегрузки тканей [1-3]. Помимо этого вся конечность, особенно большая берцовая кость, за счет нарушения соосности испытывает при ходьбе повышенные напряжения, что существенно увеличивает риск травматизма. Детальные расчетные обоснования этого эффекта в литературе отсутствуют, поэтому представляет интерес выяснение изменения характера восприятия нижней конечностью физиологических нагрузок вследствие фронтальных деформаций.

Объектом исследования является большая берцовая кость под действием осевой нагрузки. Цель работы состоит в теоретическом изучении влияния фронтальной деформации на степень нагруженности кости при осевом сжатии путем сравнительных расчетов моделей здоровой и искривленной костей. Задача рассматривается в 3-мерной постановке, критерием для сравнения является уровень напряженного состояния в наиболее нагруженной зоне кости.

Эффективным средством численного анализа статического деформирования тел и конструкций сложной геометрии является метод конечных элементов. Его применение предполагает создание объемной модели средствами твердотельного моделирования с последующей дискретизацией. В частности, для исследуемых объектов применен 10-ти узловый тетраэдральный элемент. Уровень напряженного состояния удобно оценивать обобщенными характе-

ристиками, приводящими сложное напряженное состояние к эквивалентному по опасности разрушения одноосному растяжению. Наиболее употребительной среди подобных величин является интенсивность напряжений, определяемая по координатным компонентам относительно декартовой системы  $xuz$  формулой

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 + \sigma_{zz}^2 - \sigma_{xx}\sigma_{yy} - \sigma_{xx}\sigma_{zz} - \sigma_{yy}\sigma_{zz} + 3(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{xz}^2 + \sigma_{yz}^2)}.$$

Наибольшее значение интенсивности напряжений, полученное в результате расчета каждой из рассмотренных ниже моделей, дает возможность для их сопоставления с точки зрения уровня напряженного состояния, при этом важным моментом является максимально возможное обеспечение идентичности расчетных схем.

Твердотельная модель левой берцовой кости правильной геометрии показана на рис. 1. Рис. 2 иллюстрирует ее разбиение на конечные элементы, число которых порядка 85 тысяч. Для исключения жесткого смещения модели от действия внешней нагрузки должны быть заданы кинематические ограничения. С этой целью закреплена локальная поверхность в области голенистопа, как показано на рис. 3, слева. Так же закреплена и рассмотренная ниже модель искривленной кости. Сжимающая нагрузка вдоль оси  $x$  (см. рис. 1) приложена со стороны бедренной кости и суммарно составляет 500 Н, при этом предполагается, что на каждое из двух углублений в коленном суставе, выделенных на рис. 3, справа, приходится ровно 1/2 нагрузки, а их поверхности нагружены равномерно. Подробное распределение нагрузки по поверхностям соприкосновения бедренной и берцовой костей требует решения контактной задачи об их взаимодействии, что существенно увеличивает вычислительные затраты. В то же время известно, что на удалении от места действия нагрузки напряженное состояние практически не зависит от детального характера ее приложения, значение имеет только суммарная величина нагрузки. Это служит обоснованием представленного упрощенного способа нагружения модели, тем более что для целей сопоставления напряженного состояния исследуемых объектов имеет смысл обеспечить по возможности идентичные условия нагружения.

Для характеристик материала кости приняты следующие значения: модуль упругости  $E = 500$  МПа; коэффициент Пуассона  $\nu = 0,36$  (I. Neegard, Leuyraz, A. Curnier и др., 1995). Решение системы линейных алгебраических уравнений для отыскания узловых неизвестных осуществляется модифицированным методом сопряженных градиентов.

Результаты расчета в виде полей интенсивности напряжений приведены на рис. 4, 5. Как следует из рисунков, наиболее нагруженный участок кости расположен в области лодыжки, при этом максимальная интенсивность напряжений составляет почти 12 МПа. Для оценки точности полученного решения выполнен расчет этой же модели с более мелким разбиением на конечные элементы, число которых составило порядка 135 тысяч, а отличие максимальных значений интенсивности напряжений для двух вариантов расчетной схе-

мы не превысило 4,5 %. Это позволяет считать первоначальное разбиение на элементы достаточным для получения достоверных результатов. Поэтому подобная густота разбиения с общим числом конечных элементов порядка 85 тысяч применена и для следующей модели.

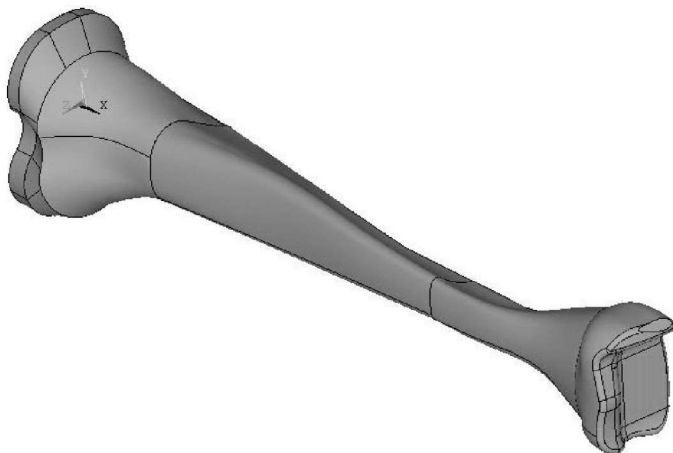


Рисунок 1

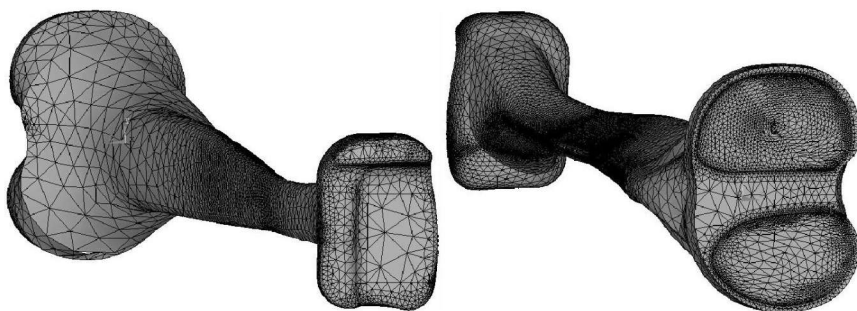


Рисунок 2

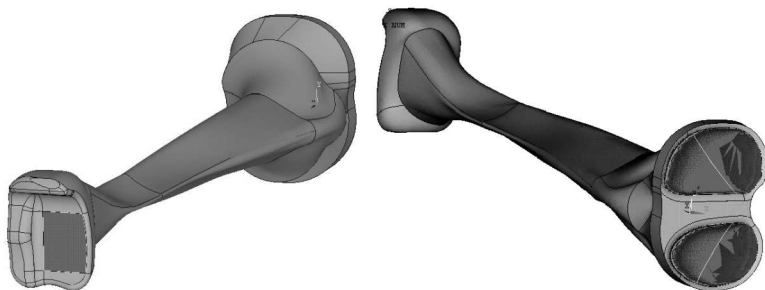


Рисунок 3

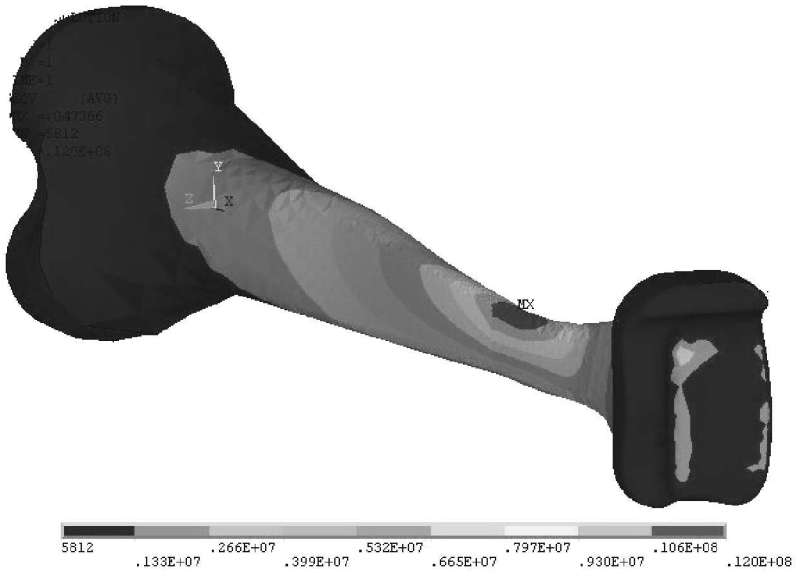


Рисунок 4

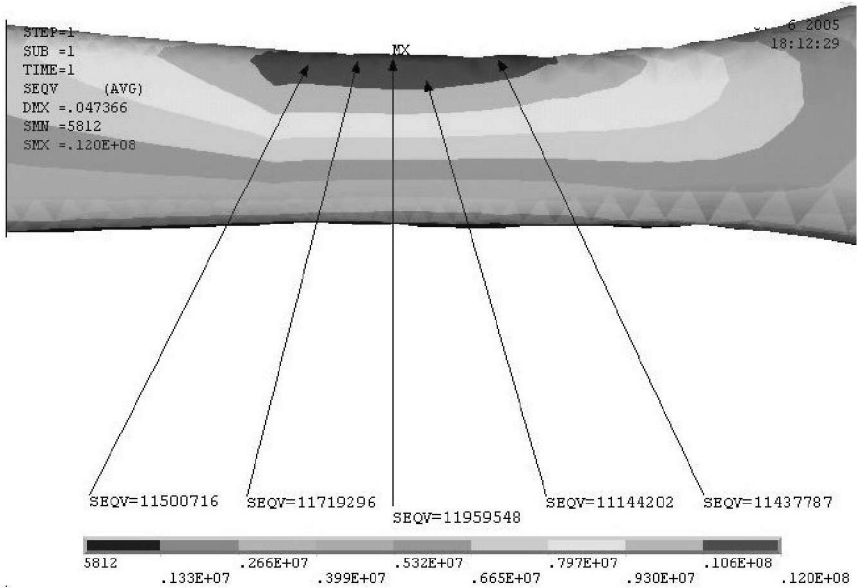


Рисунок 5

На рис. 6 показана модель искривленной кости с патологией типа вальгус, когда отклонение от механической оси достигает  $22^{\circ}$ , что значительно превышает допустимые пределы. Вследствие несоосности с бедром такая

кость нагружена неравномерно. Для расчета выбран самый неблагоприятный вариант, когда вся нагрузка приходится на одно углубление – с наружной стороны голени. Результаты расчета приведены на рис. 7, 8. Интенсивность напряжений в наиболее опасной зоне достигает величины 93,9 МПа, то есть кость испытывает в 7,8 раз большее напряжение по сравнению со здоровой.

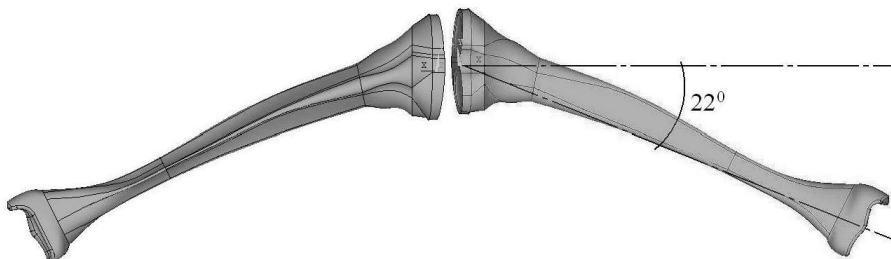


Рисунок 6

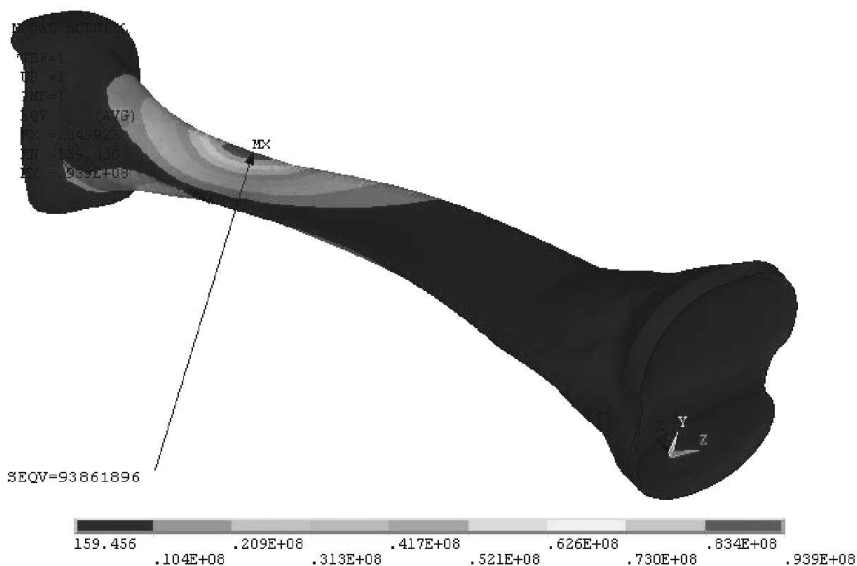


Рисунок 7

Таким образом, результаты проведенных расчетов позволяют сделать вывод о значительном возрастании уровня напряженного состояния искривленной большой берцовой кости по сравнению с недеформированной. Это может служить теоретическим обоснованием наблюдаемого в медицинской практике крайне неблагоприятного влияния фронтальной деформации и дополнительным аргументом в пользу ее оперативного исправления. Следующим этапом работы является исследование напряженного состояния оперированной кости с целью сопоставления последствий хирургической коррекции, выполненной различными способами.

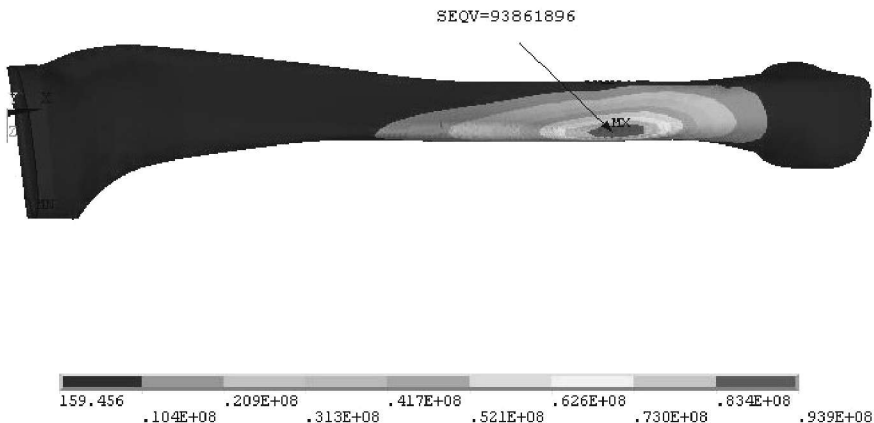


Рисунок 8

**Список литературы:** 1. *Freemant M.* Arthritis of the knee. – Berlin: Springer-Verlag, 1980. – P. 149-182. 2. *Maquet P.J.* Biomechanics of the knee. – Berlin: Springer-Verlag, 1984. – 306 p. 3. *Пустовойт Б.А., Михайлов С.Р.* Биомеханическое обоснование фронтальной остеотомии костей голени при диспластической патологии // Ортопедия, травматология и протезирование. – 2000. – №3. – С.20-25.

*Поступила в редколлегию 22.09.2006.*

УДК 681.3 (09)

***Д.В.БРЕСЛАВСКИЙ***, докт.техн.наук; ***С.А.ГОРЕЛОВА***;  
***А.А.ЛАРИН***, канд.техн.наук; НТУ «ХПИ»

## **ЗАРОЖДЕНИЕ И РАЗВИТИЕ ХАРЬКОВСКОЙ ШКОЛЫ ТЕОРИИ УПРАВЛЕНИЯ**

Стаття присвячено історії зародження теорії автоматичного управління від перших робіт Максвелла, Вишнеградського та Стодоли. Розглянуто внесок харківських інженерів та вчених у її розвиток в системах регулювання в енергетиці та космічній техніці.

The paper is devoted to the genesis of Control Theory from first papers of Maxwell, Vyshnegradsky and Stodola. The contribution of Kharkiv engineers and scientists and the development of this Theory in control systems in power engineering and spacecraft technique are suggested.

Первые промышленные конструкции с характерными для систем автоматического регулирования признаками стали появляться на рубеже XVIII-XIX вв. В качестве примеров можно привести регулятор уровня воды парового котла И.И.Ползунова, устройство регулирования потока зерна на мельницах.

Однако началом систематического развития теории автоматического