

КОРРЕКЦИЯ ВАЛЬГУСНОЙ ДЕФОРМАЦИИ ШЕЙКИ БЕДРЕННОЙ КОСТИ ПО ДАННЫМ БИОМЕХАНИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

В.И. Шевцов, И.А. Атманский, В.Д. Макушин, М.П. Тепленький,
ГУ РНЦ «ВТО» им. акад. Г.А. Илизарова, г. Курган

Произведен биомеханический анализ условий функционирования тазобедренного сустава при вальгусной деформации шейки бедренной кости и выявлены биомеханические критерии необходимой коррекции. Предложен алгоритм расчёта параметров коррекции с учётом восстановления угла вертикального соответствия, выведения вершины большого вертела на уровень кинематического центра вращения тазобедренного сустава, восстановления длины шейки и корреляционного баланса между шеечнодиафизарным и кондилодиафизарным углами.

Вальгусная деформация шейки бедренной кости характеризуется увеличением угла, образующегося пересечением продольной оси диафиза бедренной кости с осью шейки. При этом уменьшается угол вертикального соответствия, происходит смещение большого вертела дистально и медиально относительно центра вращения тазобедренного сустава, которое приводит к дисфункции

абдукторов и изменению соотношения между плечом силы веса тела и плечом силы отводящей группы мышц.

В норме угол вертикального соответствия (DEK), который образуется пересечением линии, проведенной касательно ко входу во впадину (CD) с продольной осью шейки бедра (OK), составляет 85–95° (рис. 1а).

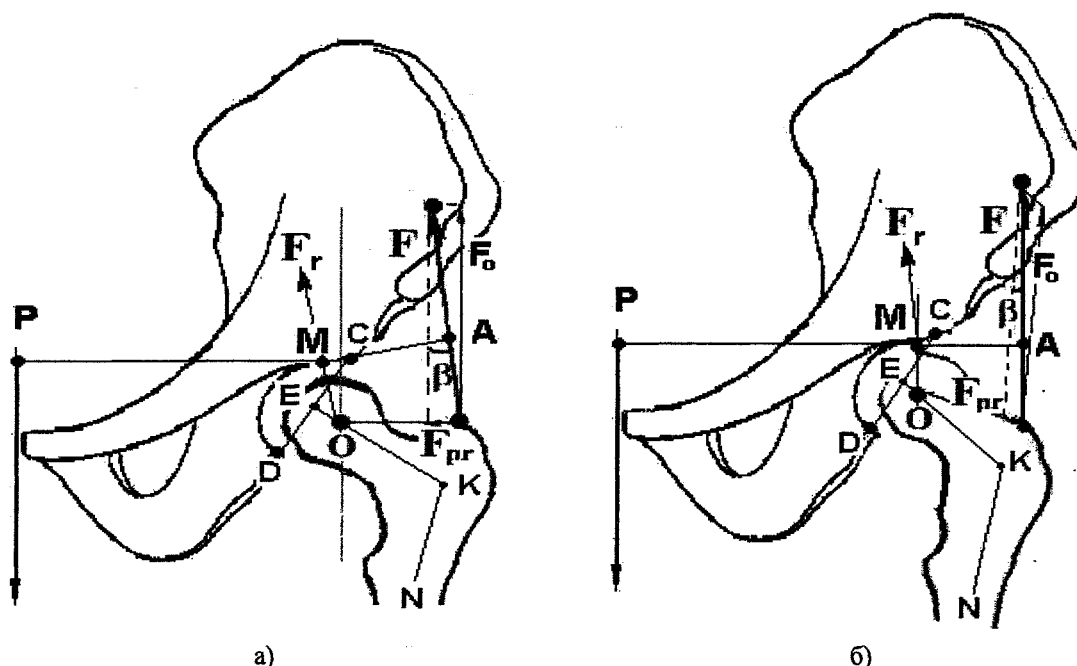


Рис. 1. Схема соотношения плеч силы веса тела и силы абдукторов и её горизонтальной и вертикальной составляющих в норме (а) и при вальгусной деформации шейки бедренной кости (б)

Уменьшение этого угла приводит к функциональной вертикализации впадины, что является фактором риска для децентрации головки бедра. Другим условием, способствующим развитию нестабильности тазобедренного сустава, является нарушение соотношения сил, обеспечивающих отведение бедра (F_o) и придавливающих головку к вертлужной впадине (F_{pr}).

В силу проекционного укорочения шейки бедренной кости происходит уменьшение угла

фронтального отклонения абдукторов (β), приводящее к уменьшению значения силы F_{pr} (рис. 1б). Данные изменения вызывают отклонение вектора результирующей силы (F_r) наружу и способствуют латерализации мгновенного математического центра вращения. Использование термина «мгновенный математический центр вращения» в данном случае является не совсем корректным в отношении классических понятий в теоретической механике. Однако, в силу того, что радиус сферы

вертлужной впадины больше радиуса головки бедренной кости, то нагрузка на тазобедренный сустав имеет точечный характер. Точка контакта, в зависимости от направления результирующей, может менять свое положение по внутренней поверхности вертлужной впадины. Следовательно, опорную точку можно рассматривать как ось вращения рычага первого рода в данный конкретный момент времени. При этом все движения осуществляются относительно центра вращения тазобедренного сустава, то есть в системе появляются два центра вращения: первый – относительно которого происходит распределение длин плеч сил, действующих в данный момент в механической системе; второй – кинематический центр вращения тазобедренного сустава. Исходя из этого, мы считаем возможным использование термина «мгновенный математический центр вращения» как характеристику контакта точки. Увеличивается плечо действия силы веса тела и уменьшается величина плеча силы абдукторов.

Поэтому, для сохранения равновесия в данной системе требуется практически двукратное увеличение значения модуля силы F_0 , и, как следствие, двукратное увеличение нагрузки на тазобедренный сустав. Избыточная нагрузка в условиях функциональной децентрации головки приводит к уплощению наружного края свода впадины.

При появлении несостоятельности абдукторов (положительном симптоме Тренделенбурга) вертикальный наклон впадины увеличивается. Одновременно с этим наблюдается и дополнительное уменьшение модуля силы F_{pr} , что неизбежно вызывает скольжение головки бедренной кости во впадине вверх и латерально. Перемещение кинематического центра вверх и латерально ещё более усугубляет биомеханические условия, приводя к формированию подвывиха бедренной кости.

Появление быстрой утомляемости мышц в области тазобедренного сустава необходимо рассматривать как проявление динамической несостоятельности абдукторов, для объективизации которой следует проводить стабилметрический мониторинг. Балансировочная активность второго и третьего типа при отсутствии рентгенологических признаков децентрации головки бедра (у детей старше 5 лет) указывает на динамическую недостаточность отводящих мышц.

Для определения недостаточности отводящих мышц предлагаем следующее рентгенометрическое тестирование: на обзорной рентгенограмме таза определяется взаиморасположение центра вертлужной впадины и центра вращения головки бедренной кости, найденных с помощью ишиометра. Вторым этапом производится аналогичная процедура на рентгенограмме, выполненной в положении стоя на исследуемой конечности после появления утомления мышц тазобедренного сустава. Различия во взаиморасположении центра

вертлужной впадины и центра вращения головки бедренной кости будут свидетельствовать в пользу несостоятельности абдукторов и целесообразности выполнения оперативной коррекции.

Скольжение головки бедренной кости во впадине вверх и латерально в равновесный одноопорный период приводит к перегрузке верхнего наружного края крыши впадины, объективным критерием которой является снижение костной плотности верхнего внутреннего отдела крыши впадины на 20–30 % по сравнению с интактным суставом и повышение плотности верхнего наружного края [1]. При двустороннем поражении следует сопоставлять показатели минеральной плотности внутреннего и наружного отделов крыши впадины.

Избыточная нагрузка на верхнюю наружную часть препятствует нормальному формированию впадины и способствует развитию вторичной деформации ацетабулярной ямки.

Важным признаком нестабильности сустава являются следующие рентгенологические показатели вертлужной впадины и центрации головки бедра: увеличение ацетабулярного индекса более 20°; уменьшение индекса толщины дна впадины менее 2,5; уменьшение угла Виберга менее 20°; уменьшение степени покрытия головки во впадине менее 90 %.

Из проведенного анализа внутренних сил, возникающих при патологических изменениях шеечно-диафизарного угла бедренной кости, вытекают следующие биомеханические положения коррекции вальгусной деформации шейки бедренной кости:

1. Коррекция должна предусматривать нормализацию угла ШДУ с учётом восстановления угла вертикального соответствия – 90° ($\angle KED$ на рис. 2).

Расчёт величины необходимой коррекции (K) с учетом нормализации угла вертикального соответствия предлагаем выполнять по следующей формуле: $K = 180^\circ - (\angle CDF + \angle EKN)$, где $\angle CDF$ – значение угла вертикального наклона вертлужной впадины (рис. 2), $\angle EKN$ – значение шеечно-диафизарного угла. Мы исходим из положения, что сумма шеечно-диафизарного угла и угла вертикального наклона должна быть равной 180°, условия, обеспечивающее максимальную стабильность тазобедренного сустава во фронтальной плоскости [2].

2. Коррекция должна предусматривать выведение вершины большого вертела на уровень кинематического центра вращения тазобедренного сустава.

3. Коррекция должна предусматривать восстановление длины шейки.

При односторонней патологии это – расстояние между центром вращения головки бедра и точкой пересечения продольных осей диафиза и шейки бедренной кости контралатерального сустава.

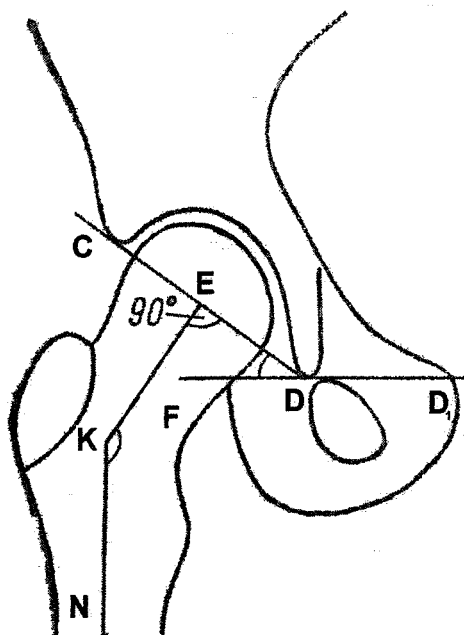


Рис. 2. Схема определения угла вертикального наклона впадины по рентгенограмме таза в передне-задней проекции.
Линия DD₁ проводится через нижние точки фигуры слезы;
линия CD проводится через основание фигуры слезы и самую наружную точку крыши вертлужной впадины;
линия EK – продольная ось шейки бедренной кости;
линия KN – продольная ось диафиза бедренной кости

В случаях с двусторонней патологией в качестве критерия определения нормальной длины шейки могут быть выбраны следующие параметры:

- β – угол фронтального отклонения абдукторов. В норме фронтальное отклонение равнодействующей силы отводящей группы мышц F (BT) в среднем составляет $37 \pm 3^\circ$;
- биомеханически оптимальное соотношение плеча действия силы веса тела (AO) и плеча действия силы абдукторов (OT₁). В среднем $|AO|$ относится к $|OT_1|$ как $4/3$, где $|AO|$ – расстояние между срединной линией таза (AP) и кинематическим центром вращения тазобедренного сустава (точка O); $|OT_1|$ – кратчайшее расстояние от точки O до линии действия равнодействующей силы отводящей группы мышц (F);
- баланс между шеечно-диафизарным и кондилodiaфизарным углами (рис. 3).

В норме между этими углами существует корреляционная зависимость, обеспечивающая выведение головки бедренной кости и центра коленного сустава на биомеханическую ось в одноопорный равновесный период. Расчёт длины шейки следует выполнять по формуле:

$$|OK| = d \times \frac{\sin \gamma}{\sin(\gamma + \varphi)}, \quad (1)$$

где $|OK|$ – расчётная длина шейки; d – длина бедренной кости от точки пересечения продольных осей диафиза и шейки бедренной кости до центра коленного сустава; γ – кондилodiaфизарный угол; φ – расчётная величина шеечно-диафизарного угла.

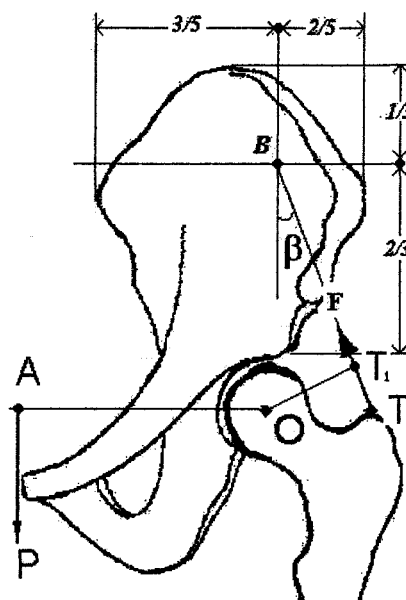


Рис. 3. Схема определения линии действия равнодействующей силы отводящей группы мышц F (BT) по схеме Н. Debrunner и угла фронтального отклонения результирующей абдукторов (β), плеча действия силы веса тела (AO) и плеча действия силы абдукторов (OT₁)

4. Планируемая коррекция не должна учитывать ротационную и сгибательную контрактуры, если только они не вызваны торсионными или другими деформациями бедренной кости.

Устранение этих контрактур за счёт коррекции бедренного компонента приведёт вторичной дисфункции малой ягодичной мышцы.

Как видно из рис. 4 такая коррекция будет приводить к сохранению патологического положения большого вертела и, как следствие, к изменению направления действия малой ягодичной мышцы.

В этих условиях эффективная работа на отведение бедра возможна только для средней ягодичной мышцы, в то время как малая будет выполнять функцию разгибания с внутренней ротацией бедра.

Проектирование оперативного вмешательства начинается с анализа рентгенограммы таза (рентгенограмму следует выполнять с фокусным расстоянием 1 м, при этом отношение между реальными размерами и получаемыми на рентгенограмме будут равны как 1 : 1,13), выполненной в прямой проекции с таким отведением бедра, чтобы верхушка большого вертела располагалась

на линии, проведённой через условные центры тазобедренных суставов, определение кондилodiaфизарного угла (γ) и длины бедренной кости

от точки пересечения продольных осей диафиза и шейки бедренной кости до центра коленного сустава (d).

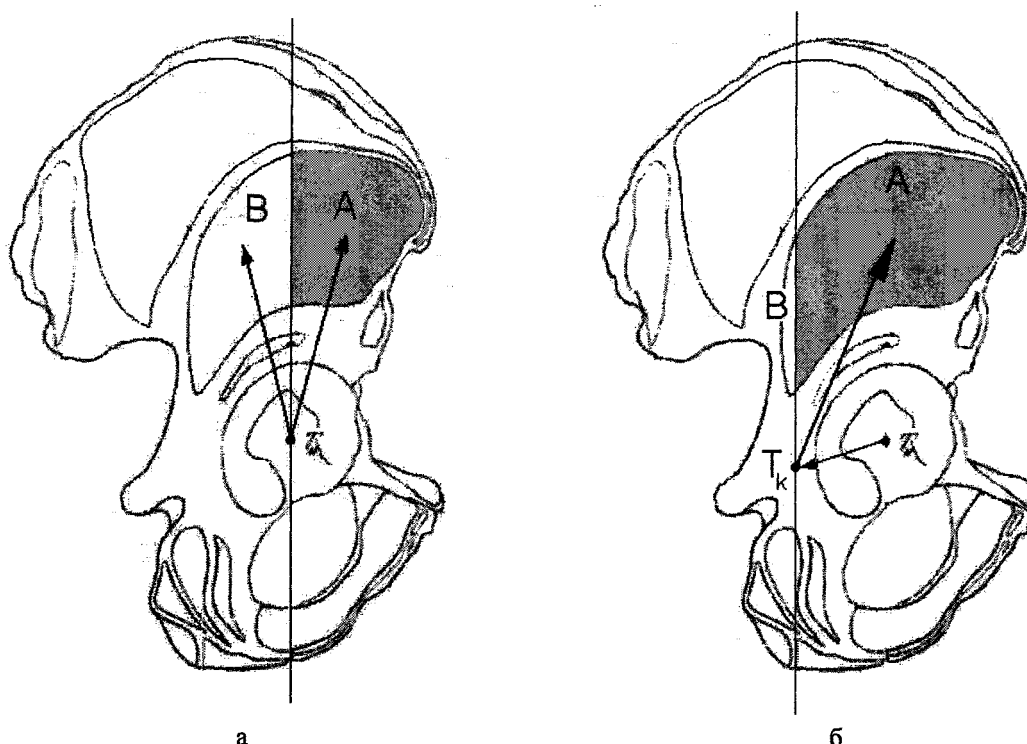


Рис. 4. Схема соотношения передних (А) и задних (В) пучков малой ягодичной мышцы в норме (а) и при фиксированном порочном положении большого вертела после устранения сгибательной и ротационной контрактур за счёт корригирующей остеотомии (б) (T_n – положение большого вертела в норме; T_k – положение большого вертела после коррекции)

Подготовительная работа для проектирования оперативного вмешательства выполняется следующим образом. На скиаграмме определяют:

- угол фронтального отклонения абдукторов (угол β на рис. 3);

- угол вертикального соответствия ($\angle KED$), образованный касательной к входу в вертлужную впадину (линия CD на рис. 2) и линией, проведённой от кинематического центра вращения тазобедренного сустава до пересечения продольных осей диафиза и шейки бедренной кости;

- угол вертикального наклона вертлужной впадины ($\angle CDF$ на рис. 2);

- угол (α), образованный продольной осью диафиза и линией, проведённой через центры тазобедренных суставов;

- $|OK|$ – длина шейки от центра тазобедренного сустава до точки пересечения продольных осей диафиза и шейки бедренной кости;

- величину отрезка BT (рис. 3).

Дальнейшие расчеты выполняются с учетом рассмотренных выше биомеханических положений коррекции.

В условиях нормального угла фронтального отклонения абдукторов ($\beta = 37 \pm 3^\circ$) и угла вертикального соответствия ($\angle KED = 90 \pm 5^\circ$).

Необходимая коррекция вальгусной деформации шейки бедренной кости должна составить $180^\circ - (\angle CDF + \angle EKN)$. С другой стороны, коррекция, обусловленная положением бедренной кости, будет равна отведению продольной оси диафиза от вертикали $(\alpha - 90^\circ) +$ величина конвергенции диафиза во фронтальной плоскости, за счёт кондилodiaфизарного угла (γ) (рис. 5а).

При этом, если значения будут равны, то величина коррекции будет определяться любым выражением.

Если же значение необходимой коррекции $(180^\circ - (\angle CDF + \angle EKN))$, будет больше, чем это обусловлено суммой угловых значений заданного отведения бедра и кондилodiaфизарного угла $((\alpha - 90^\circ) + \gamma)$, то это приведёт к варусной установке коленного сустава (рис. 5б), что потребует дополнительного смещения проксимального конца дистального фрагмента медиально (рис. 5с). Так как величина «избыточного» приведения нам известна:

$$\begin{aligned} &180^\circ - (\angle CDF + \angle EKN) - \\ &((\alpha - 90^\circ) + \gamma) = \\ &270^\circ - (\angle CDF + \angle EKN + \alpha + \gamma), \end{aligned} \quad (2)$$

Интегративная физиология, восстановительная и адаптивная физическая культура

то из треугольника NKD (рис. 5д) следует, что величина медиализации (KD), рассчитывается по следующей формуле: $d_1 \times \sin(\angle KND)$, где $\angle KND$ – величина угловой коррекции, равная величине «избыточного» приведения. Следовательно,

$$|KD| = d_1 \times \sin(270^\circ - (\angle CDF + \angle EKN + \alpha + \gamma)). \quad (3)$$

Если же значение необходимой коррекции ($180^\circ - (\angle CDF + \angle EKN)$), будет меньше чем $(\alpha - 90^\circ) + \gamma$, то это приведёт к вальгусной установке коленного сустава, что потребует дополнительного смещения проксимального конца дистального фрагмента латерально. Способ расчёта величины необхо-

димой латерализации проксимального конца дистального фрагмента будет аналогичен предыдущему варианту и рассчитывается по следующей формуле:

$$d_1 \times \sin(\alpha + \gamma + \angle CDF + \angle EKN - 270^\circ). \quad (4)$$

Данные расчёты позволяют учесть условия коррекции во взаимосвязи с углом вертикального соответствия и баланса между шеечно-диафизарным и кондилodiaфизарным углами. Если исходить из положения, что восстановление угла вертикального соответствия уже определено необходимым отведением бедра на рентгенограмме и отвечает условию – $\angle KED = 90 \pm 5^\circ$.

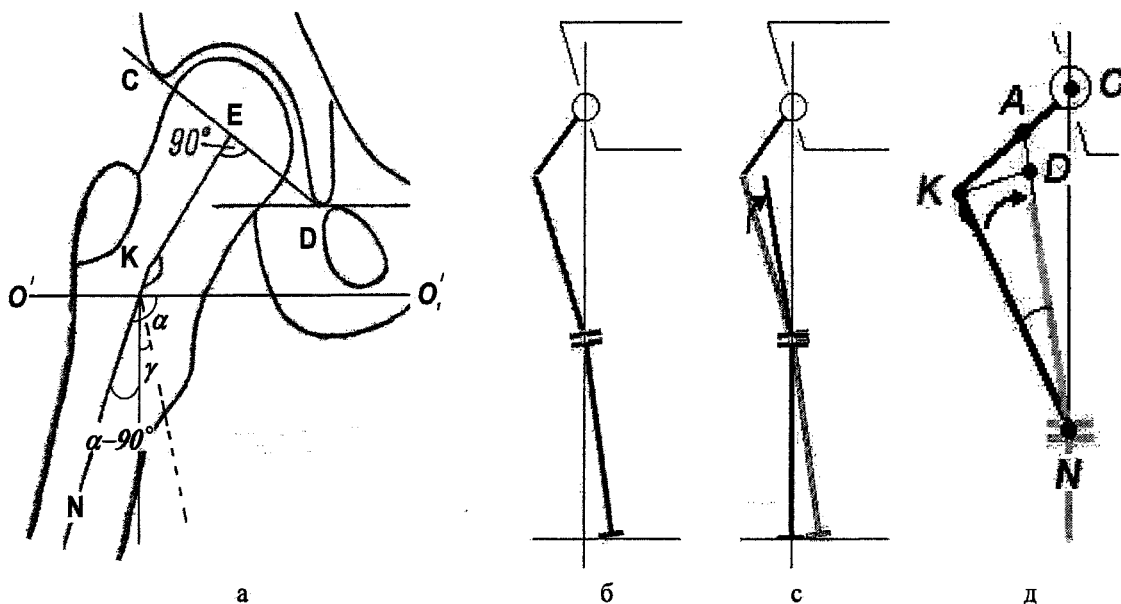


Рис. 5. Схема расчёта угловой коррекции шеечнодиафизарного угла в зависимости от величины отведения и значения кондилodiaфизарного угла (а) и величины медиализации (б, с, д)

В условиях, когда $\beta = 37 \pm 3^\circ$ и $\angle KED \neq 90 \pm 5^\circ$, оперативное вмешательство должно предусматривать дополнительную пластику большого вертела с целью нормализации его ориентации относительно кинематического центра вращения тазобедренного сустава.

Расчёты межвертельной остеотомии производят по скиаграмме с рентгенограммы таза, выполненной в прямой проекции с таким приведением бедра, чтобы продольная ось шейки бедренной кости находилась под углом 90° к касательной линии входа в вертлужную впадину (линия CD на рис. 2).

В условиях, предусмотрено $\beta < 37 \pm 3^\circ$, $\angle KED = 90 \pm 5^\circ$:

Если $(\alpha - 90^\circ) + \gamma = 180^\circ - (\angle CDF + \angle EKN)$, то оперативное вмешательство должно предусматривать выполнение остеотомии через основание шейки с последующей постепенной латерализацией бедра, угловой коррекцией и формированием дистракционного регенерата. Величина угловой коррекции при этом будет равна $(\alpha + \gamma) - 90^\circ$.

Величина латерализации бедра, с учетом проекционного увеличения, рассчитывается по следующей формуле:

$$|BT| \times \sin(39^\circ - \beta). \quad (5)$$

– Если $\alpha + \gamma < 270^\circ - (\angle CDF + \angle EKN)$, то это свидетельствует об очень маленьком кондилodiaфизарном угле. В таком случае все расчёты следует повторить со значением кондилodiaфизарного угла контралатеральной конечности и оперативное вмешательство должно дополнительно предусматривать надмыщелковую корригирующую остеотомию на величину разницы между кондилodiaфизарными углами.

– Если $\alpha + \gamma > 270^\circ - (\angle CDF + \angle EKN)$, то оперативное вмешательство должно предусматривать выполнение остеотомии через основание шейки с последующей постепенной латерализацией бедра, угловой коррекцией и формированием дистракционного регенерата. Величина

угловой коррекции будет равна $180^\circ - (\angle CDF + \angle EKN)$. Величина латерализации бедра, с учетом восстановления баланса между кондилодиафизарным и кондилодиафизарным углами рассчитывается по следующим формулам:

$$|BT| \times \sin(39^\circ - \beta) + d_l \times \sin((\alpha + \gamma) + (\angle CDF + \angle EKN) - 270^\circ), \quad (6)$$

или

$$|BT| \times \sin(39^\circ - \beta) + \left(\frac{d \times \sin \gamma}{\sin(\gamma + \varphi)} - |KO| \right). \quad (7)$$

$$S = \sqrt{h^2 \times d \sin \gamma \times \frac{d \times \sin \gamma + 2h \times \cos(\angle EDF + \angle EKN) \times \sin(\angle EDF - \gamma)}{(\sin(\angle EDF - \gamma))^2}} \quad (8)$$

$$\mu = \arcsin\left(\frac{d \times \sin \gamma - \delta}{S}\right), \quad (9)$$

где S – кратчайшее расстояние низведения большого вертела для одновременной коррекции ШДУ, нормализации угла фронтального соответствия и восстановления баланса между шеечно-диафизарным и кондилодиафизарным углами;

μ – угол фронтального отклонения от вертикали направления distraction;

d – длина бедра от точки пересечения продольных осей диафиза и шейки данной кости до центра коленного сустава;

h – длина шейки бедренной кости от кинематического центра вращения до пересечения продольных осей диафиза и шейки бедренной кости;

γ – кондилодиафизарный угол;

δ – наименьшее расстояние от продольной оси диафиза бедренной кости до кинематического центра вращения тазобедренного сустава;

$\angle EDF$ – значение угла вертикального наклона вертлужной впадины (рис. 2);

$\angle EKN$ – значение имеющего шеечно-диафизарного угла (рис. 2).

Исходным положением для оперативной коррекции будет такое положение бедра, при котором центр коленного сустава находится на линии, проведенной через центр тазобедренного сустава перпендикулярно биспинальной линии.

Если для восстановления нормальной длины шейки бедра выбраны другие критерии, то расчёт линейных и угловых параметров можно получить только с помощью точных графических построений, которые выполняются по приведённым ранее схемам (рис. 2, 3).

В условиях, когда угол $\beta \neq 37 \pm 3^\circ$, $\angle KED \neq 90 \pm 5^\circ$, $\alpha + \gamma \neq (\angle CDF + \angle EKN) - 90^\circ$, то оперативное вмешательство должно предусматривать выполнение остеотомии через основание шейки с последующей латерализацией бедра, угловой коррекцией, смещением бедра проксимально с формированием distractionного регенерата.

Если в качестве критерия восстановления нормальной длины шейки бедра взяты параметры восстановления баланса между кондилодиафизарным и шеечно-диафизарным углами, то для расчёта линейных и угловых параметров можно воспользоваться следующим формулами:

Следует отметить, что данное проектирование справедливо только для тех случаев, когда головка бедренной кости не деформирована и эпифизарная пластинка имеет нормальную ориентацию по отношению к продольной оси шейки. В случаях, когда требуется медиализация или латерализация, приведённые расчёты окажутся справедливыми, если величина смещения сопоставима с поперечными размерами диафиза бедренной кости. В противном случае все расчёты следует выполнять со значениями кондилодиафизарного угла контралатеральной конечности и оперативное вмешательство должно дополнительно предусматривать надмышелковую корригирующую остеотомию на величину разницы между кондилодиафизарными углами.

Таким образом, данное проектирование позволяет выполнять коррекцию, опираясь на индивидуальные особенности развития как бедренного, так и тазового компонентов опорно-двигательного аппарата, а не на среднестатистические показатели возрастной нормы.

Литература

1. Динамика содержания минеральных веществ в неартрозе ацетабулярной зоны / А.А. Свешников, В.Д. Макушин, С.В. Ральникова, Е.А. Волокитина // Проблемы медицины и биологии: Материалы XXVIII Юбил. обл. науч.-практ. конф., посвящ. 50-летию КурганОКБ. – Курган, 1996. – С.173–174.
2. Оперативное лечение врожденного вывиха бедра у детей / И.И. Мирзоева, М.Н. Гончарова, Е.С. Тихоненков и др. – Л.: Медицина, 1976. – 232 с.