

ОРТОПЕДИЧЕСКИЕ ГЕКСАПОДЫ: ИСТОРИЯ, НАСТОЯЩЕЕ, ПЕРСПЕКТИВЫ

© Виленский В. А., Поздеев А. П., Бухарев Э. В., Поздеев А. А., Зубаиров Т. Ф., Соломин Л. Н.

ФГБУ «НИДОИ им. Г. И. Турнера» Минздрава России, Санкт-Петербург
ФГБУ «РНИИТО им. Р. Р. Вредена» Минздрава России, Санкт-Петербург

■ Статья посвящена чрескостным аппаратам, работающим на основе пассивной компьютерной навигации, так называемым гексаподам. Их основное преимущество связано с возможностью выполнять математически точную коррекцию положения костных фрагментов в трех плоскостях и шести степенях свободы на основе расчетов, выполненных специальной прилагаемой к аппарату компьютерной программой. В настоящее время данные устройства получили наибольшее распространение при коррекции деформаций длинных трубчатых костей, однако сфера их эффективного применения этим не ограничивается. В статье описаны история появления данных устройств, их развитие, проведен сравнительный анализ основных гексаподов: TSF (Taylor Spatial Frame), ИНА (Iizarov Hexapod Apparatus), Орто-СУВ.

■ **Ключевые слова:** чрескостный остеосинтез, гексаподы, компьютерная навигация, коррекция деформаций.

Введение

В середине 90-х гг. в ортопедии появились чрескостные аппараты, работающие на основе пассивной компьютерной навигации, которые на основе общей кинематики получили обобщающее название «гексаподы» [7–11, 17]. Данные устройства позволяют одноэтапно устранить сложную многокомпонентную многоплоскостную деформацию во всех плоскостях и степенях свободы, выполнить точную репозицию перелома.

Механической основой всех существующих на сегодняшний день гексаподов являются устройства, известные в механике как параллельные механизмы [2]. В гексаподах две базы-платформы (применительно к ортопедии — кольца аппарата) соединены между собой шестью телескопически стойками, так называемыми стратами. Количество страт не связано с количеством плоскостей и степеней свободы, в которых нужно осуществлять перемещение опор относительно друг друга. При установке пяти страт система становится нестабильной, семи — перенапряженной [11]. Изменение длины даже одной страты приводит к смещению одной платформы относительно другой в трех плоскостях. Поэтому для направленного смещения одной платформы относительно другой необходима компьютерная навигация.

Навигация в робототехнике бывает активная и пассивная. При *активной навигации* компью-

тер (с одобрения оператора) управляет механическим устройством, которое и осуществляет движение. При *пассивной навигации* с механического устройства снимают определенные показатели. Эти показатели вводят в компьютерную программу, которой задают требование того или иного перемещения платформ. Программа рассчитывает изменение длин страт, необходимое для осуществления требуемого перемещения. Далее изменяют длину страт, перемещая тем самым одну платформу относительно другой (рис. 4).

История гексаподов

Первый гексапод предложил Eric Gough в 1947 г. [6] для тестирования колес под действием комбинированных сил. В 1962 г. Klaus Seppel, не имея информации об изобретении Gough, создал аналогичный механизм (рис. 1, а). В 1965 г. D. Stewart [18] предложил платформу на основе оригинального гексапода (рис. 1, б). В 2006 г. была разработана оригинальная гексаподная платформа — СУВ-платформа (рис. 1, в) [3].

Применительно к ортопедии гексапод можно рассматривать как *универсальный репозиционный узел*, позволяющий перемещать опору аппарата с закрепленным в ней костным фрагментом относительно другой по кратчайшей, интегральной, траектории.

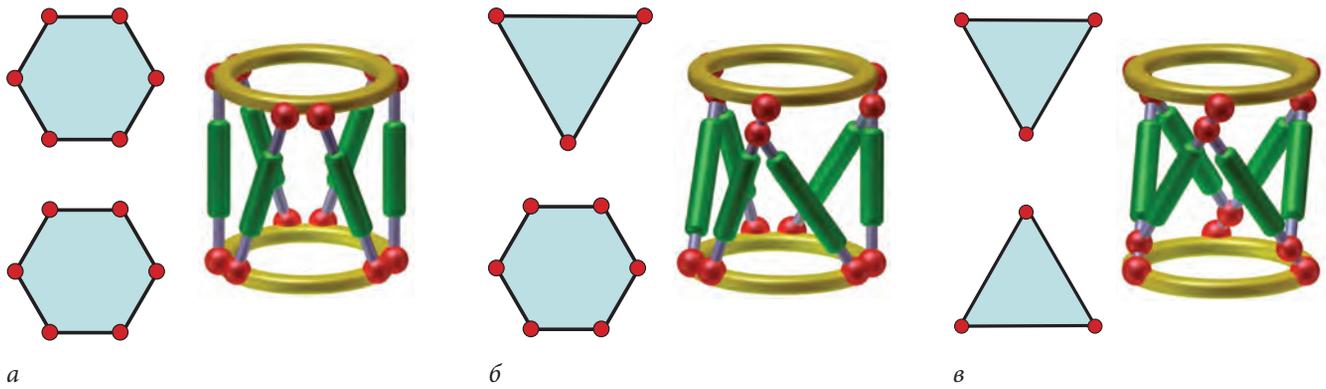


Рис. 1. Гексаподные платформы: *а* — платформа Gough-Serrell имеет раздельную фиксацию каждой из страт; *б* — платформа Stewart имеет три точки фиксации к проксимальной опоре и шесть — к дистальной; *в* — СУВ-платформа имеет три точки фиксации к проксимальной опоре и три — к дистальной

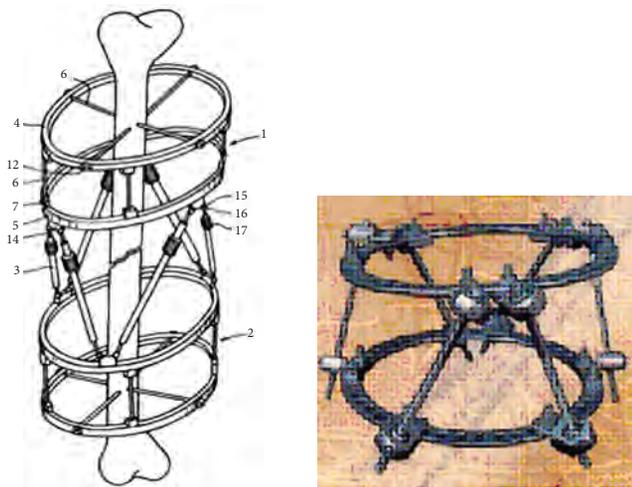


Рис. 2. Первые ортопедические гексаподы: *а* — аппарат Phillippe Moniot; *б* — гексапод РНЦ ВТО им. акад. Г. А. Илизарова

Первые попытки сделать ортопедический гексапод были предприняты в середине 80-х гг. прошлого века. Французским инженером-аэрономом Phillippe Moniot в 1985 г. был получен патент на устройство, в котором кольцевые опоры чрескостного аппарата были соединены шестью телескопическими штангами при помощи шаровых соединений. Независимо от французского изобретателя в Советском Союзе С. И. Пислером и Ю. Н. Костиним в 1984 г. было разработано оригинальное устройство, на которое в 1989 г. и было получено

авторское свидетельство (аналог патента в СССР) [10]. Следует отметить, что данных о клиническом применении указанных устройств в мировой литературе нет.

Необходимо упомянуть, что в начале 90-х гг. прошлого века в РНЦ ВТО им. акад. Г. А. Илизарова также был разработан ортопедический гексапод [15]. Указанное устройство до сих пор занимает свое почетное место в музее РНЦ ВТО им. акад. Г. А. Илизарова (рис. 2). Однако на момент появления было расценено как малоприспособное к применению и предано забвению без публикаций и попыток патентования. По-видимому, это было связано со сложностью математических (тригонометрических) расчетов, необходимых при задании любого вида перемещений в системе гексапода.

Современные гексаподы

На данный момент в клинической практике применяются следующие гексаподы: аппарат Taylor Spatial Frame (TSF) (США), Ilizarov Hexapod Apparatus (ИНА) (Германия), аппарат Орто-СУВ (Россия), аппарат Smart-correction (Турция — США), аппарат TL-Hex (США). Многочисленные исследования свидетельствуют о том, что все указанные аппараты повышают точность коррекции деформаций и уменьшают время пребывания в аппарате [1, 3, 4, 14, 16, 21].

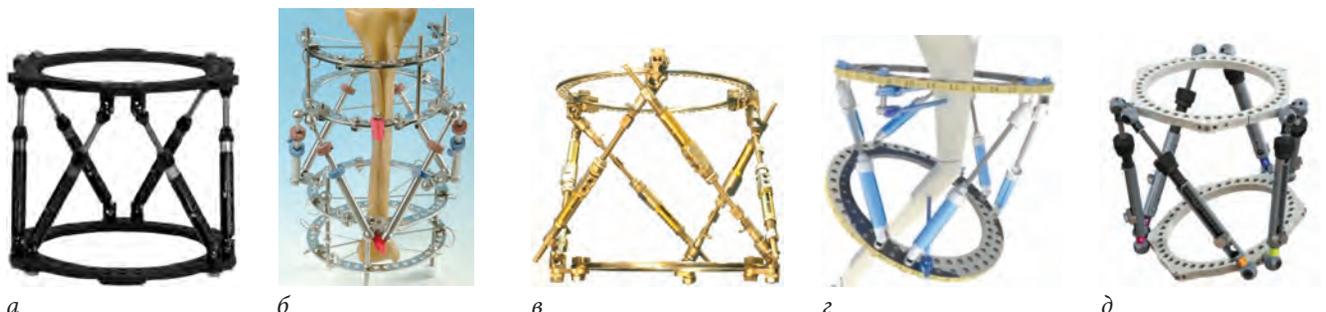


Рис. 3. Ортопедические гексаподы, используемые в клинической практике: *а* — аппарат Taylor Spatial Frame (TSF); *б* — аппарат Ilizarov Hexapod Apparatus (ИНА); *в* — аппарат Орто-СУВ; *г* — аппарат Smart-correction; *д* — аппарат TL-Hex

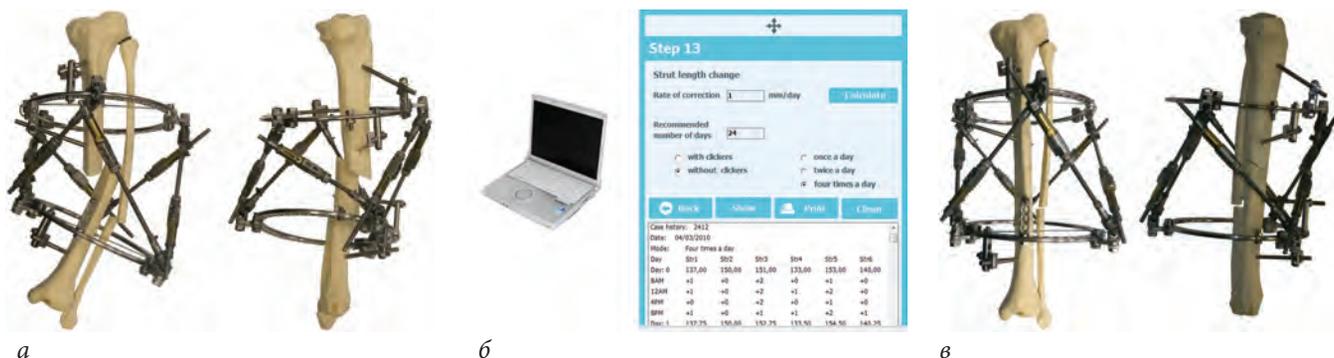


Рис. 4. Принцип работы ортопедических гексаподов: *а* — исходное положение костных фрагментов соответствует исходной длине страт; *б* — после введения необходимых данных программа рассчитывает изменение длин каждой из страт; *в* — после расчетного изменения длин страт положение костных фрагментов становится должным

В литературе можно встретить ошибочное утверждение, что известные в ортопедии гексаподы работают на основе платформы Stewart [11, 14]. В действительности TSE, Pizarov Hexapod Apparatus, Smart Correction and TL-Hex основаны на платформе Gough-Serrel. Аппарат Орто-СУВ разработан на основе платформы Соломина — Утехина — Виленского (СУВ-платформы) — гексапода, имеющего отличные от других гексаподов конструктивные особенности и кинематику (см. рис. 1, в).

Все гексаподы работают по принципу, представленному на рис. 4. Исходному положению костных фрагментов соответствует исходная длина каждой из страт. Ортопед вводит в компьютерную программу ряд данных, на основе которых программа рассчитывает, на какую величину должна быть изменена длина каждой из страт для того, чтобы обеспечить необходимое положение костных фрагментов. Ортопед решает изменить длину страт одновременно или выполнить коррекцию деформации во времени. При выборе второго варианта программа рассчитывает оптимальное количество дней коррекции.

Исторически первым ортопедическим гексаподом, примененным в клинической практике, был аппарат TSE [7, 8, 11, 21]. Его разработали братья Тэйлор: Харольд, по профессии инженер, и Чарлз — ортопед. Неофициальная информация гласит, что идея разработки аппарата возникла у братьев после посещения Курганского центра, где им и был показан упомянутый выше гексапод. Аппарат был разработан в 1994 г., патент получен в 1995 г., а первый пациент был вылечен с его помощью в 1997 г. Впоследствии права на аппарат и компьютерную программу были выкуплены у братьев Тэйлоров компанией Smith and Nephew. Будучи пионером в данной области, аппарат получил признание ортопедов Северной Америки, Канады, Европы.

Аппарат состоит из оригинальных дюралюминиевых кольцевых опор, опор 5/8 и «стопных»

опор широкой линейки типоразмеров. Все опоры имеют специальные «выноски» под страты, которые называют табами. Каждая из страт крепится к кольцу в табах, попарно в трех местах к каждому из колец. Имеется 5 типоразмеров оригинальных страт.

Независимо от братьев Тэйлор, Клаус Зайде и Диетмар Вольтер, ортопеды из Германии, в 1995 г. изобрели свой гексапод [9, 10, 14]. Данный аппарат принципиально отличается от аппарата TSE. Авторы пошли по пути позиционирования устройства как приставки (универсального репозиционного узла) к аппарату Илизарова, что и отразили в названии: Pizarov Hexapod Apparatus (ИНА). Права на продажу ИНА принадлежат компании Litos. Аппарат подразумевает использование стандартных колец аппарата Илизарова. Слово «стандартных» призвано подчеркнуть, что расстояние между отверстиями в кольцах каждого типоразмера должно быть определенным, стандартным. Без учета данного требования аппарат работать не будет. Страты ИНА, в отличие от страт TSE, разработаны как двойной телескоп, который соединяется с кольцами аппарата при помощи шаровых соединений (у TSE — карданы). Несмотря на то что первое клиническое применения ИНА датируется 1996 г., на данный момент география применения данного гексапода более скромна: Германия, Израиль, Бразилия.

В 2006 г. в Санкт-Петербурге был разработан аппарат Орто-СУВ [1, 3–5, 16, 20]. Пройдя ряд модификаций, он был готов к широкому клиническому применению в 2009 г. и в настоящее время используется в России, Италии, Японии, Греции, Индии, Таиланде, на Филиппинах, в Бразилии, Южной Корее, Египте, Канаде, Индонезии. Принципиальным отличием аппарата является то, что он, как это было указано выше, имеет оригинальную кинематическую платформу, которая и обеспечивает отличительные конструктивные особенности и работу компьютерной программы.

Аппарат позиционируется как универсальный репозиционный узел для любого кольцевого аппарата внешней фиксации. Официальным производителем аппарата Орто-СУВ является компания S. H. Pitkar Orthotools Pvt. Ltd. (Индия).

Среди других известных на сегодняшний день ортопедических гексаподов следует назвать Smart-Correction и TL-Hex (рис. 3, д, е). Первый используется с 2010 г., второй был анонсирован в 2013 г. Оба в настоящее время производятся в США: Smart-Correction — компанией Responce Ortho LLC [10], TL-Hex — компанией OrthoFix [12]. Эти аппараты еще не получили широкого распространения, о чем свидетельствуют единичные публикации [10, 12], поэтому мы не смогли провести их сравнительного анализа.

Сравнение ортопедических гексаподов

Ниже приведены основные преимущества и недостатки TSF, ИНА и Орто-СУВ аппаратов. При работе над этим разделом использованы данные мировой литературы [7–10, 14, 21] и собственные исследования [1, 4, 16, 20].

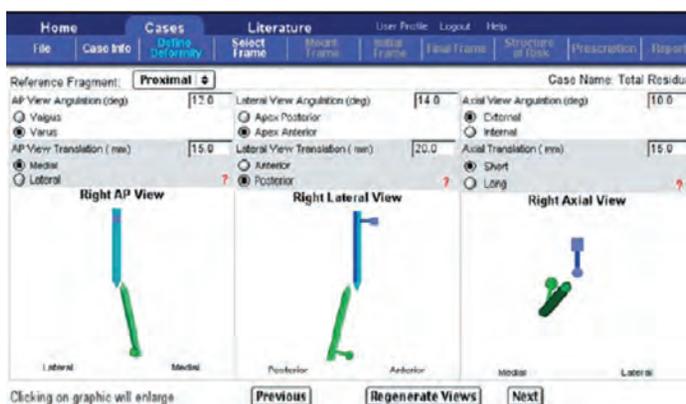
Taylor Spatial Frame

Представляется возможным отметить следующие *преимущества* металлоконструкции:

- страты снабжены удобной для пациента шкалой, по которой легко определить изменение длины страты во время коррекции. Дополнительно упрощает использование страт наличие кликеров — устройств, издающих щелчки при изменении длины страты на величину 1 мм;
- наряду с режимом постепенной коррекции деформации имеется режим «быстрых страт», удобный для одномоментной коррекции деформации или репозиции перелома.

Недостатки аппарата:

- возможно использование только оригинальных внешних опор;
- фиксация страт возможна только к базовой и перемещаемой опорам и в строго определенных местах («табах»). Последнее опасно возникновением конфликта «страта — чрескостный элемент»;
- первый таб при компоновке аппарата должен быть расположен строго кпереди. Изменение положения таба ведет к необходимости введения в компьютерную программу дополнительных параметров;
- аппарат имеет выраженную исходную нестабильность, связанную с люфтом двенадцати карданных соединений. Клинически это выражается в болевом синдроме, ощущении пациентом подвижности костных фрагментов;
- минимальный однократный шаг изменения длины страт составляет 1 мм;
- в процессе коррекции деформации возникает необходимость замены страт (5 типоразмеров), что является достаточно трудоемким процессом;
- проксимальная опора должна быть установлена строго перпендикулярно анатомической оси кости во фронтальной и сагиттальной плоскостях. Невыполнение этого требования приводит к необходимости введения дополнительных данных в программу;
- при выполнении рентгенограмм центр луча должен быть направлен не на вершину деформации, как это принято в ортопедии, а на проксимальное кольцо аппарата, что может привести к просчетам при планировании коррекции. Условным *преимуществом программы* аппарата TSF является ее расположение в Интернете, т. е. имеется «облачный» сервис (рис. 5).



а



б

Рис. 5. Окна программы TSF: а — вид окна программы в 2006 г. Виртуально смоделирована деформация: проксимальный костный фрагмент в виде синего цилиндра, дистальный — в виде зеленого; б — вид окна в 2015 г.: программа дополнена фотографией модели деформированной кости

При рассмотрении недостатков программы необходимо напомнить, что она была разработана в 1994–1995 гг. и соответствовала уровню развития программирования того времени. За прошедшие годы компьютерные технологии и системы сделали значительный шаг вперед, однако производителями, к сожалению, не было предпринято никаких попыток вывести программу на новый уровень; были проведены лишь незначительные изменения дизайна (см. рис. 5).

Недостатками компьютерной программы TSE являются:

- большое количество измерений (25), которые необходимо вводить в программу;
- практически все вводимые в программу данные должны быть предварительно измерены на аппарате и рентгенограмме «вручную», что трудоемко и достаточно часто приводит к ошибкам. Кроме этого, часть измерений, полученных на рентгенограммах, должна быть подвергнута тригонометрическим расчетам. Этот недостаток привел к тому, что ряд компаний изготовил специальные дополнительные программы, позволяющие упростить получение данных, измеряемых на рентгенограммах [13];
- полное отсутствие контроля над возможными ошибками пользователя. Если принять во внимание, что визуализация в программе весьма условная и при любых, даже ошибочно введенных данных программа в результате покажет правильное положение двух цилиндров, имитирующих костные фрагменты, то понятно, почему ошибка зачастую может быть выявлена только после выполнения контрольных рентгенограмм;
- в программе используется техническая терминология и существует необходимость введения ряда технических, не имеющих отношения к классической ортопедии параметров измерений;
- расчет, выполненный программой, предлагает однократное изменение длин страт кратностью, не меньше чем 1 мм/сут, что может отразиться на качестве дистракционного регенерата.

Ilizarov Hexapod Apparatus

У ИНА имеется несколько конструктивных преимуществ. Первое из них связано с тем, что в конструкцию страт вместо карданов введены шаровые шарниры. Это резко снижает исходную нестабильность аппарата. Следующим преимуществом является шаг изменения длины страты 0,1 мм. Третье — аппарат использует широко распространенные в мире кольца аппарата Илизарова, что делает его более доступным. Четвертое — ортопед волен выбирать места фиксации страт к опорам — аналог «табов» отсутствует.

Могут быть названы следующие *недостатки* ИНА:

- в каждом типоразмере колец количество отверстий и расстояние между ними должны соответствовать стандарту, заложенному в программу. Таким образом, могут быть применены аппараты Илизарова не всех производителей;
- страты имеют только один типоразмер, что ограничивает применение данного аппарата при сложных деформациях;
- страты не имеют шкалы, что затрудняет их использование пациентом и врачом;
- недостаточная техническая проработанность: наличие кликеров в стратах ИНА можно считать вполне условным; болт, фиксирующий длину страты, выполнен из пластика и подвержен поломкам;
- фиксация страт, как и в TSE, возможна только к базовой и перемещаемой опорам. Это резко ограничивает возможность использования аппарата в ситуациях, когда из-за выраженной угловой деформации или по иным причинам кольца находятся на очень близком расстоянии — «едва касаются»;
- отсутствует режим «быстрых страт», удобный для одномоментной коррекции деформации или репозиции перелома.

Компьютерную программу ИНА можно рассматривать как «калькулятор с расширенными опциями» (рис. 6). Программа не имеет «облачного» сервиса и устанавливается на компьютер с любого носителя цифровой информации. Других достоинств данная программа, в сравнении с программой аппарата TSE, не имеет; если не считать за достоинство ее «простоту». Работа с программой сводится к введению цифровых значений, ранее измеренных на аппарате и рентгенограммах. Все недостатки программы ИНА практически в равной степени соответствуют недостаткам программы TSE.

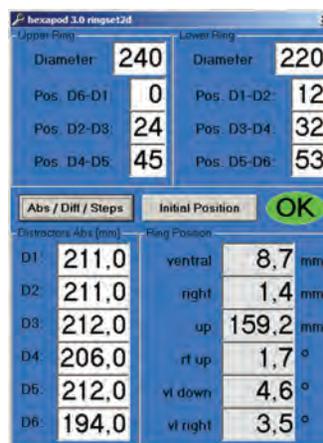


Рис. 6. Окно программы ИНА: указаны цифровые значения диаметра опор, длин страт, расположение мест фиксации страт к опорам и цифровые значения угловых деформаций

Аппарат Орто-СУВ

Инженерная проработка этого аппарата была начата после оценки положительных качеств и недостатков TSF и ИНА [1, 4].

Преимуществами металлоконструкции являются (рис. 7):

- могут использоваться внешние опоры любого производителя, любой формы и любого типа, за исключением моноклатеральных и арочных;
- внешние опоры можно накладывать под любым углом по отношению к осям костных фрагментов без необходимости внесения дополнительных данных в программу;
- кость может располагаться как в центре опоры, так и эксцентрично;
- страты можно фиксировать как непосредственно к опорам, так и с помощью прямых или Z-образных платиков;
- страты можно фиксировать не только к базовой и перемещаемой, но и к дополнительным стабилизирующим опорам;
- места фиксации страт к опорам хирург может выбрать произвольно. Следует стремиться к тому, чтобы расстояние между точками фиксации страт к опорам было одинаковым, благодаря чему на каждой опоре формируются равносторонние треугольники. Однако это условие не является обязательным;
- длина страт формально не ограничена и зависит от длины используемых резьбовых стержней;
- как и в TSF, наряду с режимом постепенной коррекции деформации, имеется режим «быстрых страт»;
- при постепенной коррекции деформации возможно изменение длины страты шагом 0,25 мм.

Ни один из указанных параметров не требует введения дополнительных специальных данных в компьютерную программу.

Однако аппарат Орто-СУВ не лишен и *недостатков*. Основной из них — относительная его громоздкость, связанная с выступающими за пределы корпусов страт резьбовыми стержнями. Шкала страты отражает лишь величину изменения ее длины; определение абсолютной длины страт требует специальных измерений. В предлагаемых на сегодняшний день производителями стратах отсутствуют кликеры, что затрудняет работу с аппаратом пациентами. Отсутствие необходимости замены типоразмеров страт имеет обратную сторону: необходимость проведения так называемой процедуры «реверса», что может быть выполнено в большинстве случаев только специалистом-ортопедом.

Компьютерная программа Орто-СУВ (рис. 8), в отличие от компьютерных программ других ортопедических гексаподов, использует для расчетов рентгенограммы пациентов, которые загружаются непосредственно в программу. Поэтому имеется только 12 параметров, которые необходимо измерить на металлоконструкции вручную. Программа анализирует все введенные параметры и предупреждает пользователя о возможных ошибках. Имеется возможность выполнения планирования коррекции деформации как по анатомическим, так и по механическим осям костных фрагментов. Полная визуализация планирования коррекции деформации достигается двумя костными контурами: желтым и красным. Желтый контур — это исходное положение перемещаемого фрагмента. Желтый контур делает пользователь, используя опции программы. Красный контур —

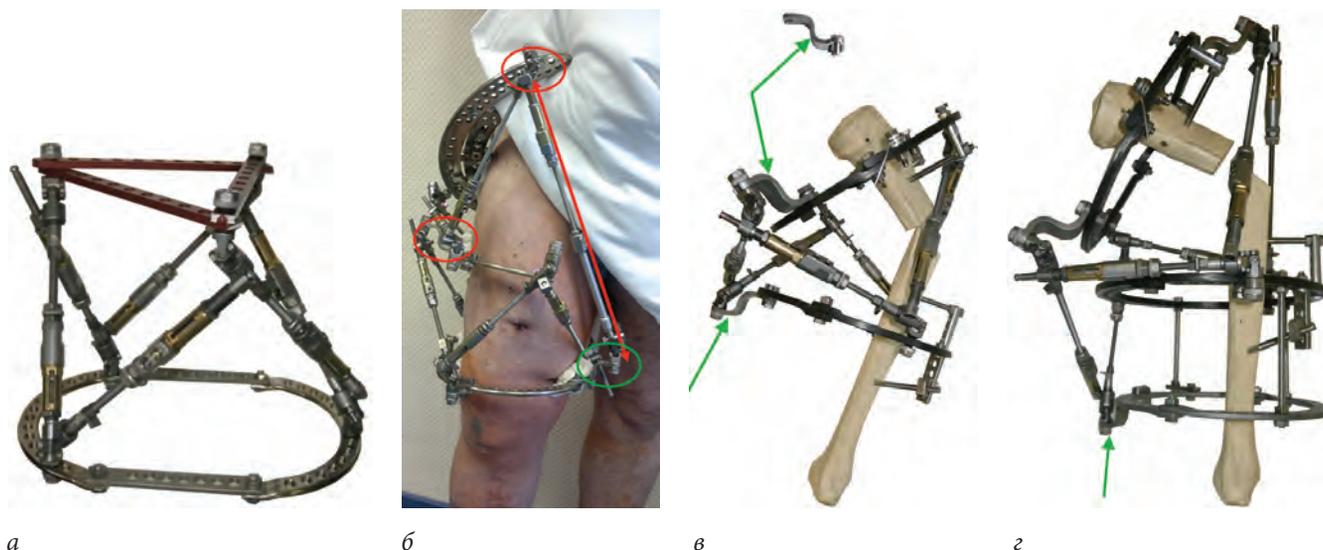
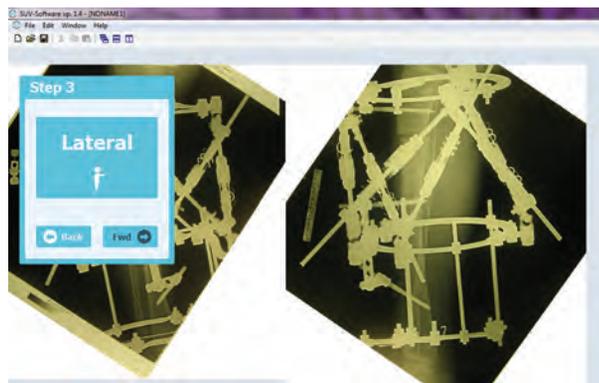
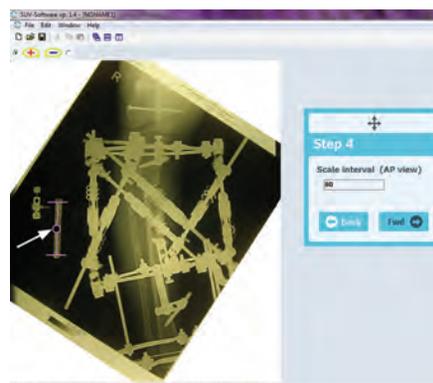


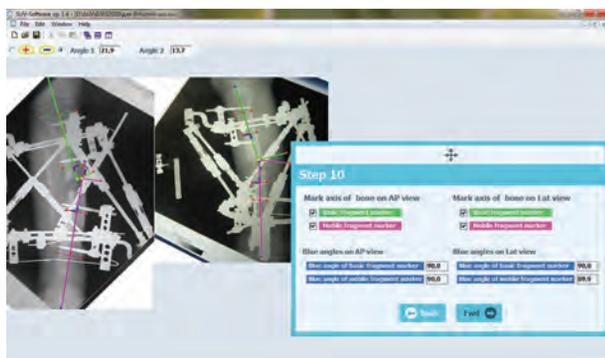
Рис. 7. Особенности компоновки аппарата Орто-СУВ. *а* — страты могут быть фиксированы к любым внешним опорам, даже экзотическим; *б* — ортопед выбирает места фиксации страт произвольно (длина страты зависит от длины используемого резьбового стержня); *в, г* — при близком расположении колец используют Z-образные пластики или фиксируют страты к дополнительным кольцам



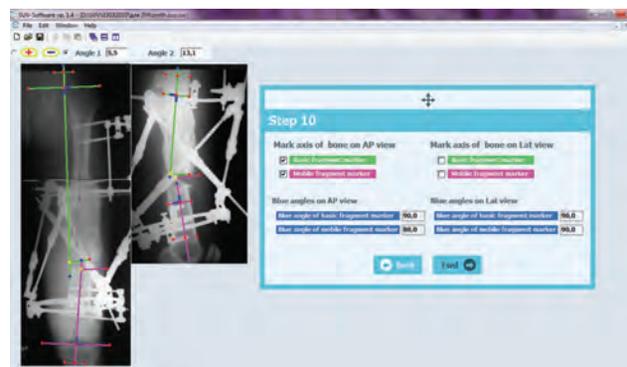
а



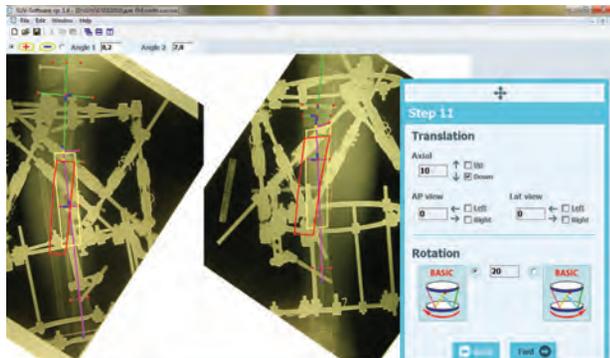
б



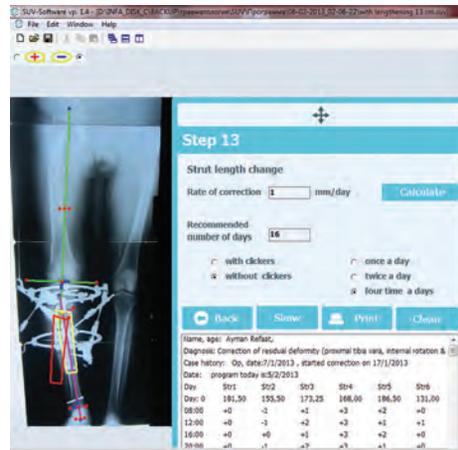
в



г



д



е

Рис. 8. Некоторые окна программы Орто-СУВ. а — рентгенограммы загружаются непосредственно в программу; б — имеется опция масштабирования; в, г — планирование коррекции деформации на основе анатомических и механических осей; д — желтый костный контур — исходное положение перемещаемого фрагмента, красный костный контур — финальное положение перемещаемого фрагмента, предлагаемое программой. Пользователь может переместить красный контур в любое положение; е — программа рассчитала оптимальный темп коррекции деформации

это финальное положение перемещаемого фрагмента после коррекции деформации, которое рассчитывает программа. Ортопед имеет возможность изменить положение красного контура на прямой и боковой рентгенограммах: осевое перемещение, трансляция, ангуляция и ротация. Для обеспечения оптимальных условий формирования дистракционного регенерата и исключения тракционного повреждения мягких тканей программа использует две структуры риска (у программы TSF — одна; у ИНА — нет). В дополнение к этому имеются различные варианты опций расчета режимов коррекции: шагом 1 мм/сут, 0,5 мм/сут и 0,25 мм/сут.

Перспективные направления развития

Исходя из рассмотренных выше недостатков существующих гексаподов, полагаем, что дальнейшее развитие чрескостных аппаратов этого типа может быть связано со следующими направлениями:

1. Уменьшение громоздкости аппаратов и их веса. Реализация данной задачи может быть возможна за счет применения новых легких и прочных материалов, например биокomпозитов. Эта инновация сможет повысить рентгенпрозрачность аппарата, так как шесть металлических страт зачастую перекрывают необходимые для планирования и выполнения коррекции деформации ориентиры.

2. Дальнейшая роботизация гексаподов. С этой целью должны быть усовершенствованы моторизованные страты. Разработанные к настоящему времени [21] громоздки, тяжелы и не в состоянии решить проблему смены типоразмеров страт. Перспективным представляется и изобретение специальных электронных ключей («смарт-ключей»). Это позволит упразднить необходимость присутствия на стратах шкал, сделает процесс изменения длин страт более удобным. Конечная цель роботизации — возможность соответствия ортопедических гексаподов требованиям активной компьютерной навигации.

3. Весьма перспективным выглядит переход от программ, основанных на двухплоскостном планировании (прямая и боковая рентгенограммы), к 3D-технологиям. Реализация этого направления позволит значительно повысить точность планирования и коррекции деформаций, особенно в случаях, когда имеется торсионный компонент деформации.

Заключение

На сегодняшний день аппараты на базе компьютерной навигации широко используются в ортопедии не только при лечении деформаций длинных трубчатых костей разной степени сложности. Они нашли свое применение при коррекции сложных деформаций среднего и заднего отделов стопы, контрактурах, вывихах и подвывихах крупных суставов, а также при лечении переломов [1, 5, 7–9, 19]. Данные устройства значительно увеличили эффективность лечения пациентов за счет высокой точности направленного перемещения костных фрагментов и уменьшения времени, необходимого для коррекции деформации [3, 11, 16]. Однако ни один из существующих гексаподов не лишен недостатков, что открывает перспективы дальнейшего совершенствования этой группы устройств.

Литература

1. Виленский В.А. Разработка основ новой технологии лечения пациентов с диафизарными повреждениями длинных костей на базе чрескостного аппарата со свойствами пассивной компьютерной навигации: дис. ... канд. мед. наук. СПб., 2009;284. [Vilenskiy VA. Razrabotka osnov novoy tekhnologii lecheniya patsientov s diafizarnymi povrezhdeniyami dlinnykh kostey na baze chreskostnogo apparata so svoystvami passivnoy komp'yuternoy navigatsii: dis. ... kand. med. nauk. SPb., 2009;284.]
2. Кун С., Госселин К. Структурный синтез параллельных механизмов: пер. с англ. М.: Физматлит, 2012;276. [Kun S, Gosselin K. Strukturnyy sintez paralel'nykh mekhanizmov: per. s angl. M.: Fizmatlit, 2012;276.]
3. Скоморошко П.В. Оптимизация лечения больных с диафизарными деформациями бедренной кости на основе использования чрескостного аппарата со свойствами пассивной компьютерной навигации (экспериментально-клиническое исследование): дис. ... канд. мед. наук. СПб., 2014;224. [Skomoroshko PV. Optimizatsiya lecheniya bol'nykh s diafizarnymi deformatsiyami bedrennoy kosti na osnove ispol'zovaniya chreskostnogo apparata so svoystvami passivnoy komp'yuternoy navigatsii (eksperimental'no-klinicheskoe issledovanie): diss. ... kand. med. nauk. SPb., 2014;224.]
4. Соломин Л.Н., Виленский В.А., Утехин А.И., Террел В. Сравнительный анализ репозиционных возможностей чрескостных аппаратов, работающих на основе компьютерной навигации и аппарата Илизарова// Гений ортопедии. Курган, 2009;(1):5-10. [Solomin LN, Vilenskiy VA, Utekhin AI, Terrel V. Sravnitel'nyy analiz repozitsionnykh vozmozhnostey chreskostnykh apparatov, rabotayushchikh na osnove komp'yuternoy navigatsii i apparata Ilizarova. Geniy ortopedii. Kurgan, 2009;(1):5-10.]
5. Соломин Л.Н., Виленский В.А., Утехин А.И. Орто-СУВ-аппарат: чрескостный аппарат, работа которого основана на компьютерной навигации// Гений ортопедии. 2011;(2):161–169. [Solomin LN, Vilenskiy VA, Utekhin AI. Orto-SUV-apparat: chreskostnyy apparat, rabota kotorogo osnovana na komp'yuternoy navigatsiiyu. Geniy ortopedii. 2011;(2):161–169.]
6. Bonev I. The True Origins of Parallel Robots: <http://www.parallelemic.org/Reviews/Review007p.html>, Jan; 24, 2003.
7. Eidelman M, Chezar A. Principles of deformity correction using the Taylor Spatial Frame. Harefuah. 2005; 144(2):152–158.
8. Feldman DS, Shin SS, Madan SS, Koval KJ. Correction of tibial malunion and non-union with six-axis analysis deformity correction using the Taylor Spatial Frame. J. Orthop. Trauma. 2003;17:549–554.
9. Odesski J. Our experience of application the Ilizarov Hexapod Apparatus. 5th Meeting of the A.S.A.M.I. International: program and abstract book. St. Petersburg, 2008;60.
10. Paley D. History and science behind the six-axis correction external fixation devices in orthopaedic surgery. Oper Tech Orthop. 2011;21:125-128.
11. Paley D. Principles of deformity correction. New York: Springer-Verlag, 2005;806.
12. Samchukov M, Cherkashin A, Ross D. Hexapod external fixation: Advantages and clinical applications. J.O.R.I.M (Japanese Association of Orthopedic Reconstruction and Ilizarov Method): program and abstract book. Tokio, 2014; 23.
13. Segev E, Hemo Y, Wientroub S. Intra- and interobserver reliability analysis of digital radiographic measurements for pediatric orthopedic parameters using a novel PACS integrated computer software program. Journal of Children's Orthopaedics 2010;4(4):331-341. doi:10.1007/s11832-010-0259-5.
14. Seide K, Wolter D, Kortmann HR. Fracture reduction and deformity correction with the hexapod Ilizarov fixator. Clin Orthop. 1999;6:186-195.
15. Shevtsov VI, Mishina NI. The Ilizarov method as fundamental and motive force of international ASAMI. 5th Meeting of the A.S.A.M.I. International: program and abstract book. St. Petersburg, 2008;46.
16. Solomin LN, Paley D, Shchepkina EA, Vilenskiy VA, Skomoroshko PV. A comparative study of the correction of femoral deformity between the Ilizarov apparatus and Ortho-SUV Frame. Int Orthop. 2014 Apr; 38(4):865-72.

17. Solomin LN. The basic principles of external skeletal fixation using the Ilizarov and other devices. 2nd Edition. Springer-Verlag, Milan Heidelberg, New-York, 2012;1593.
18. Stewart D. A platform with six degrees of freedom. Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers. 1965;180(1):371-386.
19. Takata M, Vilensky VA, Tsuchiya H, Solomin LN. Foot deformity correction with hexapod external fixator, the Ortho-SUV Frame™. J Foot Ankle Surg. 2013 May-Jun;52(3):324-30.
20. Taylor JC. A new look at deformity correction. Distraction. The Newsletter of ASAMI-North America. 1997;5(1).
21. Taylor Spatial Frame (TSF) – Motorised Ilizarov alternative, Hexapod – Orthopaedic ring fixator. 2009. <http://www.youtube.com/watch?v=VfZhVRDAKVA> (дата обращения: 11.02.2015)

ORTHOPEDIC HEXAPODS: HISTORY, PRESENT AND PROSPECTS

Vilensky V.A., Pozdeev A.P., Bukharev E.V., Pozdeev A.A., Zubairov T.F., Solomin L.N.

The Turner Institute for Children's Orthopedics, Saint-Petersburg, Russian Federation

Vreden RRITO, Saint-Petersburg, Russian Federation

✧ The article is dedicated to computer-assisted external fixation devices, so-called hexapods. The main advantage of these frames is capability to make mathematically precise correction of bone fragments in three planes and six degrees of freedom on the base of calculations made in special software application. Recently these devices are mostly applied in long bone deformity correction but the sphere of its effective use

is not limited by only this direction. The article presents the history of investigation of these devices, their development, implemented comparative analysis of the basic hexapods: TSF (Taylor Spatial Frame), ИА (Ilizarov Hexapod Apparatus) and Ortho-SUV Frame.

✧ **Keywords:** external fixation, hexapods, computer navigation, deformity correction.

Сведения об авторах:

Виленский Виктор Александрович — к. м. н., научный сотрудник отделения костной патологии ФГБУ «НИДОИ им. Г. И. Турнера» Минздрава России. 196603, СПб, г. Пушкин, ул. Парковая, д. 64–68. E-mail: vavilensky@mail.ru.

Vilensky Viktor Aleksandrovich — MD, PhD, research associate of the department of bone pathology. FSBI “Scientific and Research Institute for Children's Orthopedics n. a. G. I. Turner” under the Ministry of Health of the Russian Federation. 196603, Saint-Petersburg, Pushkin, Parkovaya str., 64-68. E-mail: vavilensky@mail.ru.

Поздеев Александр Павлович — д. м. н., профессор, главный научный сотрудник отделения костной патологии ФГБУ «НИДОИ им. Г. И. Турнера» Минздрава России. 196603, СПб, г. Пушкин, ул. Парковая, д. 64–68. E-mail: prof.pozdeev@mail.ru.

Pozdeev Aleksander Pavlovich — MD, PhD, professor, chief research associate of the department of bone pathology. FSBI “Scientific and Research Institute for Children's Orthopedics n. a. G. I. Turner” under the Ministry of Health of the Russian Federation. 196603, Saint-Petersburg, Pushkin, Parkovaya str., 64-68. E-mail: prof.pozdeev@mail.ru.

Бухарев Эдгар Валентинович — к. м. н., научный сотрудник отделения костной патологии ФГБУ «НИДОИ им. Г. И. Турнера» Минздрава России. 196603, СПб, г. Пушкин, ул. Парковая, д. 64–68.

Bukharev Edgar Valentinovich — MD, PhD, research associate of the department of bone pathology. FSBI “Scientific and Research Institute for Children's Orthopedics n. a. G. I. Turner” under the Ministry of Health of the Russian Federation. 196603, Saint-Petersburg, Pushkin, Parkovaya str., 64-68.

Поздеев Андрей Александрович — к. м. н., врач травматолог-ортопед отделения костной патологии ФГБУ «НИДОИ им. Г. И. Турнера» Минздрава России. 196603, СПб, г. Пушкин, ул. Парковая, д. 64–68. E-mail: aapozdeev@gmail.com.

Pozdeev Andrey Aleksandrovich — MD, PhD, orthopedic and trauma surgeon of the department of bone pathology, FSBI “Scientific and Research Institute for Children's Orthopedics n. a. G. I. Turner” under the Ministry of Health of the Russian Federation. 196603, Saint-Petersburg, Pushkin, Parkovaya str., 64-68. E-mail: apozdeev@gmail.com.

Зубаиров Тимур Фаизович — к. м. н., научный сотрудник отделения костной патологии ФГБУ «НИДОИ им. Г. И. Турнера» Минздрава России. 196603, СПб, г. Пушкин, ул. Парковая, д. 64–68.

Zubairov Timur Faizovich — MD, PhD, research associate of the department of bone pathology. FSBI “Scientific and Research Institute for Children's Orthopedics n. a. G. I. Turner” under the Ministry of Health of the Russian Federation. 196603, Saint-Petersburg, Pushkin, Parkovaya str., 64-68.

Соломин Леонид Николаевич — д. м. н., профессор, ведущий научный сотрудник ФГБУ «РНИИТО им. Р. П. Вредена» Минздрава России. Профессор кафедры хирургии с курсом травматологии и ортопедии СПбГУ. 195427, СПб., ул. Академика Байкова, д. 8. E-mail: solomin.leonid@gmail.com.

Solomin Leonid Nikolaevich — MD, PhD, professor, leading research associate of the FCBI Vreden RRITO Ministry of Health of the Russian Federation. Professor of the chair of Surgery with the course of Traumatology and Orthopedics SPSU. 195427, St.-Petersburg, Akademika Baykova str., 8. E-mail: solomin.leonid@gmail.com.