

*С. И. Геращенко, С. М. Геращенко, А. И. Кислов,
Н. Н. Янкина, А. С. Кибиткин*

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ КОСТНОГО РЕГЕНЕРАТА ДЖОУЛЬМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

В статье представлены материалы джоульметрических исследований костного регенерата при переломах костей. Исследования показали, что с помощью джоульметрического метода можно осуществлять ежесуточный контроль формирования костной ткани при переломах костей, определять оптимальный момент начала distraction и ежесуточную величину дозированных однократных перемещений костных фрагментов. Установление зависимости джоульметрических параметров и формирующейся костной ткани позволяет существенно повысить качество оценки состояния костной ткани на протяжении периода лечения по сравнению с рентгеновским методом.

При удлинении конечности производят остеотомию кости в метафизарных отделах, затем фиксируют фрагменты костей в компрессионно-дистракционном аппарате (на практике в основном используется аппарат Илизарова).

В участке сочленения костных фрагментов образуется костный регенерат, который постепенно преобразовывается в костную ткань. При созревании костного регенерата до определенной степени, при которой можно производить его растягивание, опоры аппарата Илизарова перемещают вместе с костными фрагментами на определенную дозированную величину. Перемещение опор производится через определенный интервал времени (обычно перемещение осуществляют ежесуточно) до достижения необходимой для удлинения конечности величины в течение периода distraction.

После окончания периода distraction наступает период фиксации, когда конечность остается жестко фиксированной в компрессионно-дистракционном аппарате до окончания лечения больного, т.е. до образования в участке удлинения нормальной костной ткани.

Серьезной проблемой при удлинении конечности является определение оптимального момента начала distraction, т.к. преждевременная distraction или distraction, проведенная с запозданием, приводит либо к distraction костного регенерата, когда distractionный костный регенерат еще не достиг оптимального созревания, либо к distraction, проведенной с запозданием, когда distractionный костный регенерат уже перешел в стадию формирования костной ткани. В первом случае происходит формирование неполноценного distractionного костного регенерата, что может привести к перелому на этом участке, а во втором – разрыв distractionного костного регенерата, вследствие чего возникает необходимость выждать время (7–10 дней) для образования нового участка сочленения (зоны роста) distractionного костного регенерата [1]. Затем distraction возобновляется. В целом подобная тактика приводит к различным осложнениям, к увеличению случаев травматичности и сроков реабилитации больных.

Необходимо также определить оптимальную скорость и дробность distraction, т.к. эти величины, наряду с другими биологическими факторами,

существенно влияют на репаративную регенерацию кости и функциональное состояние удлиняемой конечности.

Скорость дистракции характеризуется величиной суточного удлинения (мм в сутки), дробность дистракции – количеством дистракционных перемещений за сутки. Этими двумя факторами определяется величина разового удлинения (мм) [2–6].

В настоящее время для контроля формирования костной ткани как при переломах костей, так и при удлинении конечности используется в основном рентгеновский метод, не дающий объективной оценки изменений, происходящих в зоне перелома [7].

Заживление перелома происходит главным образом за счет периостальной грануляционной ткани, из которой формируется так называемая костная мозоль.

Формирование мозоли проходит три стадии: соединительнотканную, остеонидную и костную. Излившаяся из разорванных сосудов кровь образует в области перелома гематому. В течение первых 7–10 дней в области перелома формируется желвак пролиферирующей соединительной ткани. Затем в течение примерно такого же времени происходит метапластическое превращение незрелой соединительной ткани в остеонидную. В образовавшееся остеонидное вещество откладывается известь, таким образом идет формирование костной мозоли.

Процесс регенерации кости проходит стадию уплотнения линии перелома (костного шва). У взрослых первые нежные облаковидные очаги обызвествления появляются на рентгенограмме в среднем не раньше 3–4 недель. Линия перелома на рентгенограмме исчезает в периоде между четвертым и восьмым месяцем.

Выраженное клиническое сращение переломов различных костей наступает в разные сроки: кости фаланг – 2,5 недели; метакарпальные, метатарзальные кости и ребра – 3 недели; ключица – 3,5–4 недели; кости предплечья, лодыжки – 7–8 недели; диафиз плеча – 6–7 недель; диафиз большеберцовой кости, шейка плеча – 8–9 недель; обе кости голени – 10 недель; позвонки – 16–18 недель; таз – 10 недель. Сроки формирования костной мозоли зависят от многих причин: локализации перелома, возраста и общего состояния пациента, наличия сопутствующих заболеваний, инфицирования, степени фиксации отломков и других причин. Процесс перестройки костной структуры продолжается около года [8].

В костной ткани постоянно протекают метаболические процессы как минеральных, так и органических компонентов, интенсивность которых в ряде случаев превышает активность метаболизма таких органов, как печень, кожа и др. Именно эти указанные особенности позволяют кости, адаптируясь к воздействию усилий аппарата чрескостного остеосинтеза, формировать дистракционный регенерат и в конечном итоге восстанавливать длину конечности пациента [9–11].

Степень кристаллизации минерала в новообразованной костной ткани регенератов характеризует величина отношения концентрации кальция и фосфора (Ca/P) (таблица 1) [12].

Дистракционные регенераты имеют пять зон, различающихся по своей объемно-пространственной организации: зона слабоминерализованной сре-

динной прослойки, примыкающие к ней по обе стороны зоны цилиндрических первичных остеонов и граничащие с ними зоны сфероидальных костных лакун, располагающиеся у концов отломков и в их костномозговом канале.

Таблица 1

Содержание кальция и фосфора в регенератах и в неповрежденном диафизе большеберцовой кости (корковый слой вместе с костномозговым каналом) (в процентах)

Исследованные элементы	Продолжительность эксперимента (сутки)				Неповрежденный диафиз
	3	5	12	19	
Кальций	$0,14 \pm 0,01$	$0,21 \pm 0,01$	$6,08 \pm 0,29$	$8,56 \pm 0,41$	$10,7 \pm 0,12$
Фосфор	$0,09 \pm 0,01$	$0,14 \pm 0,01$	$3,07 \pm 0,15$	$4,22 \pm 0,19$	$5,06 \pm 0,06$
Кальций / фосфор	$1,55 \pm 0,01$	$1,50 \pm 0,01$	$1,98 \pm 0,12$	$2,03 \pm 0,13$	$2,11 \pm 0,02$

Ширина срединной прослойки, составляющая через 7–14 суток distraction 0,5–0,8 мм, к концу периода удлинения увеличивается до 2–3 мм. Через 30 суток последующей фиксации оперированной конечности в аппарате ширина прослойки вновь сокращается, а на отдельных участках полностью замещается костной тканью. В этот период начинает формироваться и кортикальный слой новообразованного участка диафиза, компактизация которого продолжается и через 180 суток после снятия аппарата [13, 14].

В течение периода лечения минеральная плотность костного регенерата изменяется. По данным, представленным в таблице 2, можно проследить изменения в костном регенерате от начала периода distraction до окончания периода фиксации [15].

Результаты в таблице 2 представлены в виде $M \pm m$, где M – среднее арифметическое выборки, m – стандартная ошибка (ошибка среднего), p – уровень значимости t -критерия Стьюдента.

Изменение минеральной плотности костного регенерата по мере его созревания приводит к изменению его электрических и электрохимических свойств. При воздействии на него электрического тока в нем протекают сложные электрохимические процессы, меняющие его свойства. Поэтому оценивать состояние костного регенерата можно с помощью электрохимических методов анализа.

Наиболее приемлемым из электрохимических методов для решения подобных задач является джоульметрический метод [16], позволяющий отслеживать динамику изменения состояния при воздействии тока.

Исследования с помощью джоульметрического метода проводились в травматологическом отделении областной клинической больницы им. Н. Н. Бурденко. Больным с переломами нижних конечностей и с необходимостью удлинения в процессе проведения операции с закреплением отломков костей в аппарате Илизарова в участке сочленения костных фрагментов устанавливались электроды, выполненные в виде изолированной от мягких тканей иглы.

Измерения проводились с помощью джоульметрического прибора «ДИВО» на четырех токах 8 мкА, 22 мкА, 47 мкА, 104 мкА в течение периода лечения больных. Время измерений на каждом токе составляло 8 и 16 секунд.

Таблица 2

Изменение минеральной плотности (г/см²)
в дистракционном регенерате бедра

Этапы остеосинтеза	Участки регенерата		
	Проксимальный	Срединная зона	Дистальный
	МП на здоровой конечности – 1,499 ± 0,034		
	МП на удлиняемой конечности – 1,326 ± 0,041, $p < 0,005$		
Дистракция 30 дней	0,450 ± 0,016 $p < 0,001$	0,230 ± 0,014 $p < 0,001$	0,413 ± 0,016 $p < 0,001$
Дистракция 60 дней	0,524 ± 0,020 $p < 0,001$	0,150 ± 0,009 $p < 0,001$	0,469 ± 0,022 $p < 0,001$
Конец периода дистракции	0,599 ± 0,024 $p < 0,001$	0,120 ± 0,008 $p < 0,001$	0,555 ± 0,022 $p < 0,001$
Компрессия	0,750 ± 0,025 $p < 0,001$	0,285 ± 0,018 $p < 0,001$	0,690 ± 0,021 $p < 0,001$
Фиксация 30 дней	0,810 ± 0,019 $p < 0,001$	0,408 ± 0,019 $p < 0,001$	0,735 ± 0,025 $p < 0,001$
Конец периода фиксации	0,824 ± 0,019 $p < 0,001$	0,854 ± 0,025 $p < 0,001$	0,795 ± 0,031 $p < 0,001$
Дни после снятия аппарата:			
– 30 дней;	0,944 ± 0,034 $p < 0,001$	0,932 ± 0,026 $p < 0,001$	0,914 ± 0,025 $p < 0,001$
– 60 дней;	1,043 ± 0,041 $p < 0,001$	0,989 ± 0,027 $p < 0,001$	0,996 ± 0,036 $p < 0,001$
– 90 дней;	1,169 ± 0,034 $p < 0,001$	1,081 ± 0,021 $p < 0,001$	1,124 ± 0,034 $p < 0,001$
– 150 дней;	1,434 ± 0,038 $p > 0,1$	1,419 ± 0,045 $p > 0,1$	1,458 ± 0,032 $p > 0,1$
– 1,5 года	1,511 ± 0,029 $p > 0,1$	1,542 ± 0,042 $p > 0,1$	1,525 ± 0,039 $p > 0,1$

Измерялись значения работы, затрачиваемой током на изменение костного регенерата; осуществлялась синхронная запись и оцифровка входного и выходного сигналов при каждом измерении, которые использовались в процедурах идентификации и получении параметров, характеризующих костный регенерат.

Графики входных и выходных сигналов, полученных при исследовании свойств костного регенерата у больных с переломом нижних конечностей, приведены на рисунке 1.

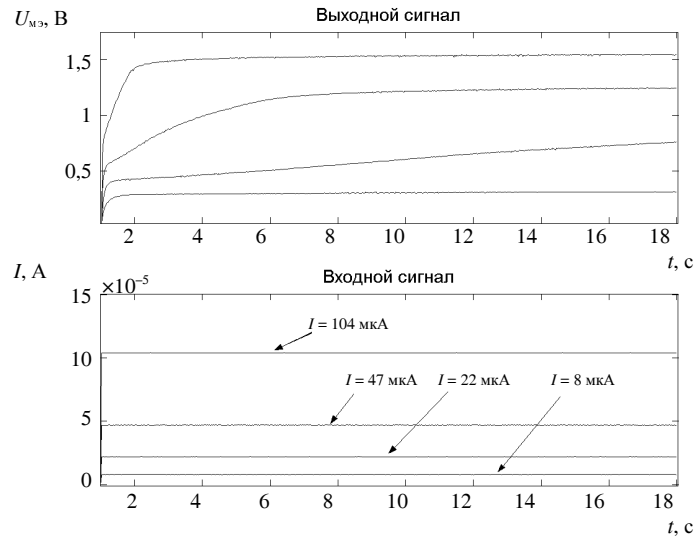


Рис. 1 Графики входных и выходных сигналов, полученных при исследовании свойств костного регенерата у больных с переломом нижних конечностей

На рисунке 2 приведена динамика работы тока 104 мкА при длительности воздействия на костный регенерат 16 с в течение периода лечения восьми больных с переломом нижних конечностей.

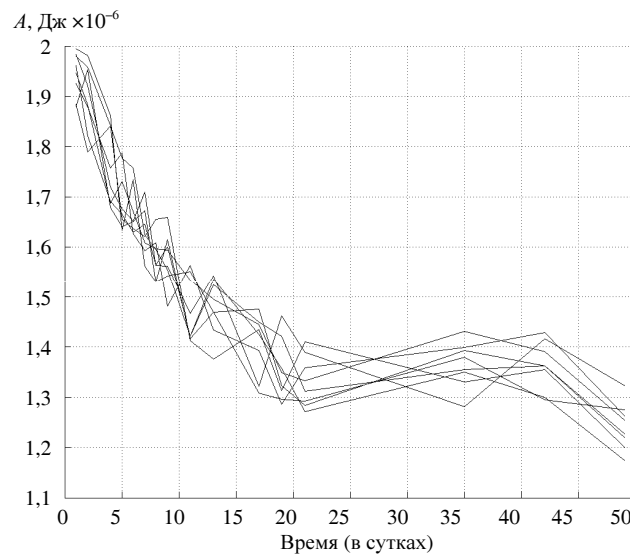


Рис. 2 Динамика работы тока 104 мкА при длительности воздействия на костный регенерат 16 с в течение периода лечения восьми больных с переломом нижних конечностей

На рисунке 3 приведена динамика работы четырех токов 8, 22, 47 и 104 мкА при длительности воздействия на костный регенерат 16 с в течение периода лечения больного А (19 лет, история болезни № 4519, операция была произведена 09.03.04 г., диагноз: неправильно консолидированный перелом нижней трети левого бедра).

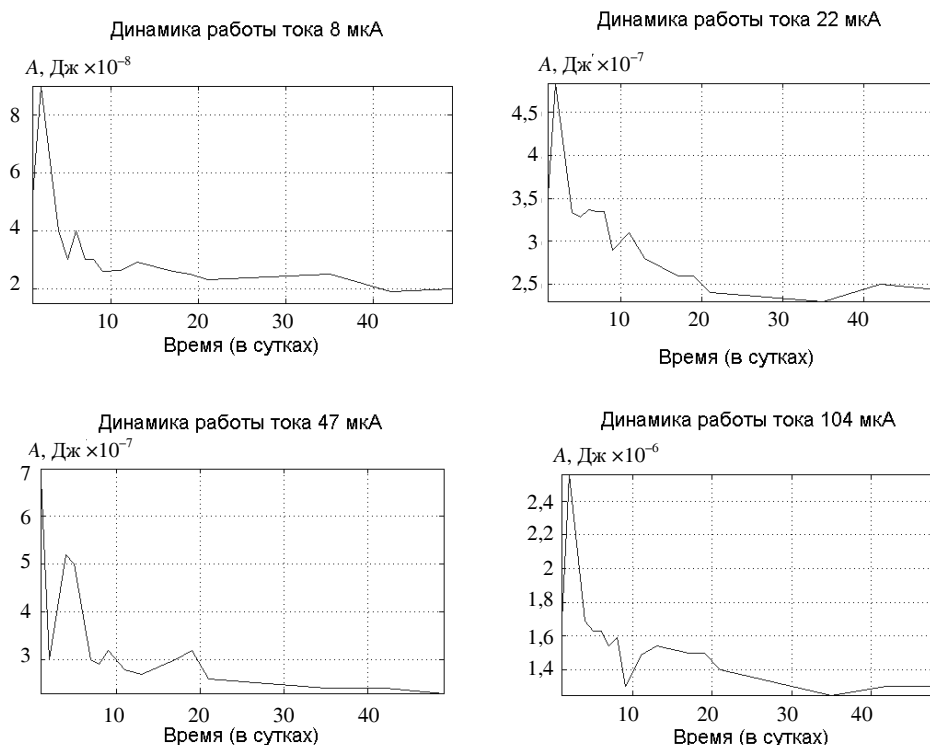


Рис. 3 Динамика работы четырех токов в течение периода лечения больного А при длительности воздействия на костный регенерат 16 с

Больным для удлинения конечностей ежедневно в одно и то же время осуществляли distraction и производили измерения до начала distraction и после distraction. Distraction началась на седьмые сутки после операции.

На рисунке 4 приведена динамика работы четырех токов 8, 22, 47 и 104 мкА при длительности воздействия на костный регенерат 16 с в течение периода distraction больного Б (36 лет, история болезни № 16721), поступившего в отделение травматологии и ортопедии 29.08.05 г. с диагнозом: постостеомиелитический дефект левой голени 6 см.

На рисунке 5 приведена динамика работы четырех токов 8, 22, 47 и 104 мкА при длительности воздействия на костный регенерат 8 с в течение периода distraction больного Б.

На рисунке 6 приведена динамика работы четырех токов 8, 22, 47 и 104 мкА при длительности воздействия на костный регенерат 16 с в течение периода distraction больного В (32 года, история болезни № 17368), поступившего в отделение травматологии и ортопедии 04.09.05 г. с диагнозом: неправильно консолидированный перелом нижней трети левого бедра, укорочение левого бедра 4 см.

В результате исследований костной ткани у больных с переломами нижних конечностей и с необходимостью удлинения было установлено, что по мере преобразования костного регенерата в костную ткань значения работы тока уменьшаются и постепенно становятся постоянными, приближаются к значениям работы, измеренным в нормальной кости.

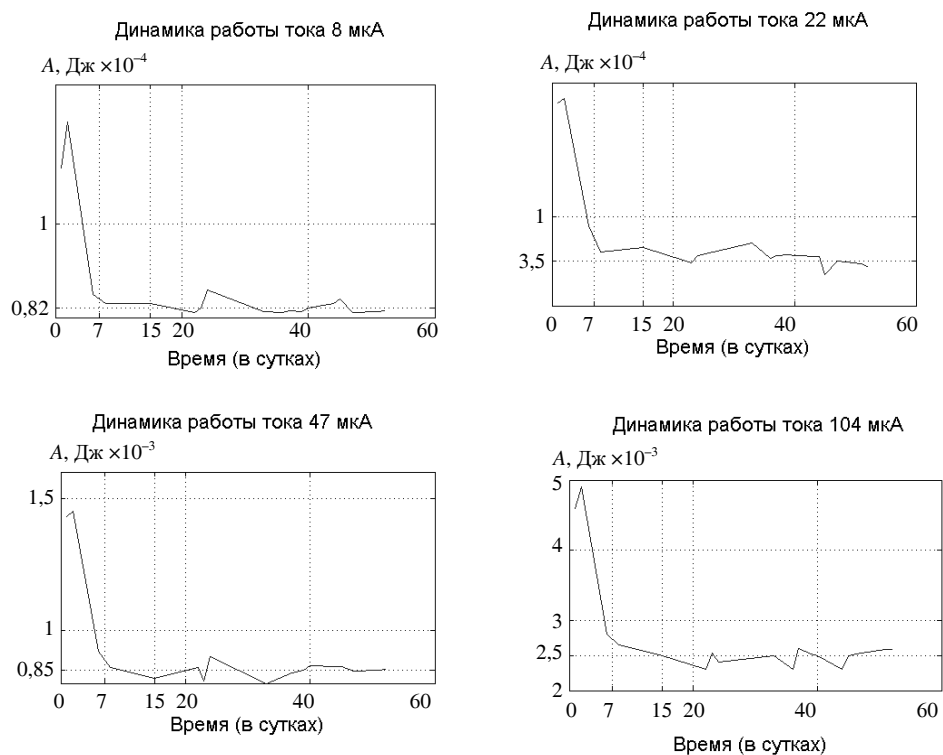


Рис. 4 Динамика работы четырех токов в течение периода distraction больного Б при длительности воздействия на костный регенерат 16 с

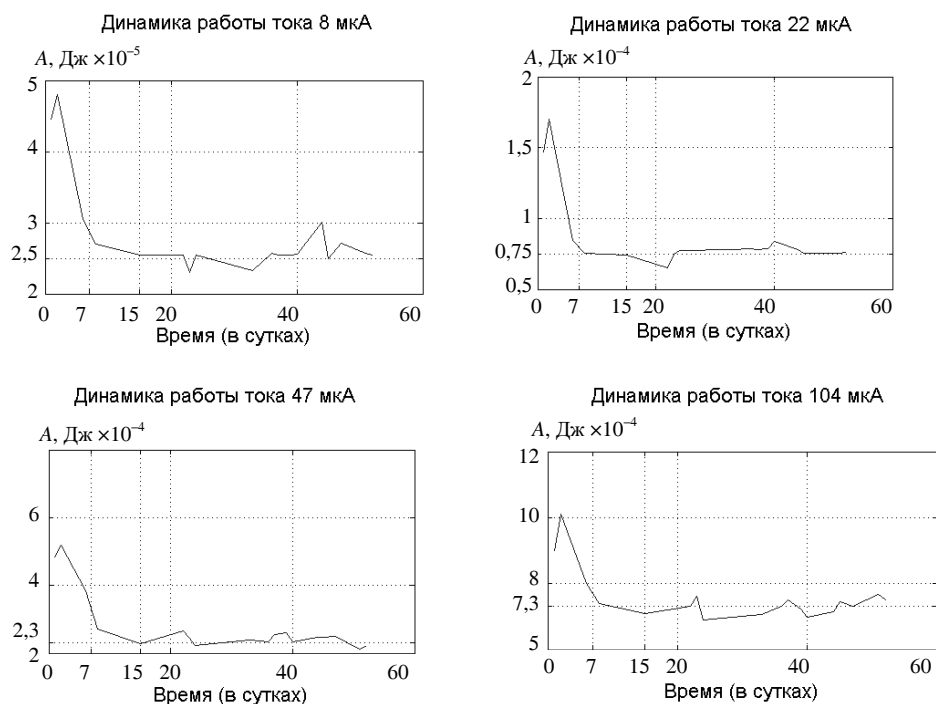


Рис. 5 Динамика работы четырех токов в течение периода distraction больного Б при длительности воздействия на костный регенерат 8 с

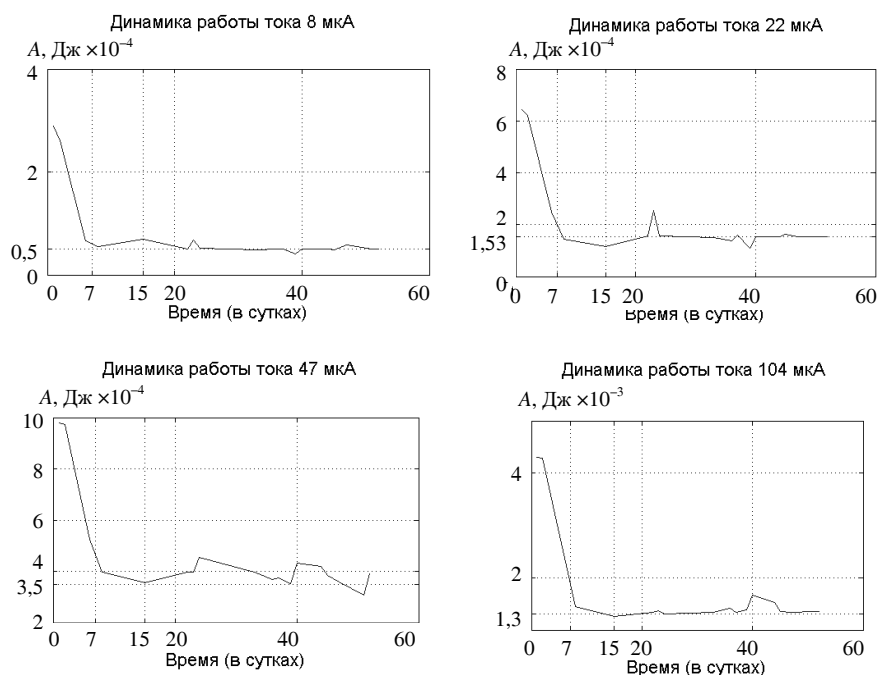


Рис. 6 Динамика работы четырех токов в течение периода distraction больного В при длительности воздействия на костный регенерат 16 с

На рисунке 7 приведена динамика работы четырех токов 8, 22, 47 и 104 мкА при длительности воздействия на костный регенерат 8 с в течение периода distraction больного В.

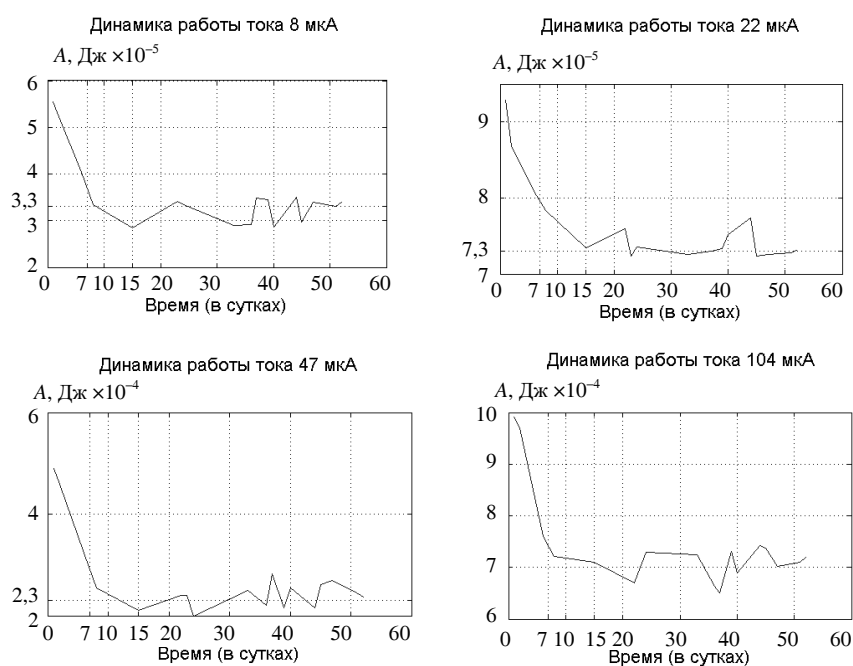


Рис. 7 Динамика работы четырех токов в течение периода distraction больного В при длительности воздействия на костный регенерат 8 с

Рентгеновские снимки больных Б и В приведены на рисунке 8.

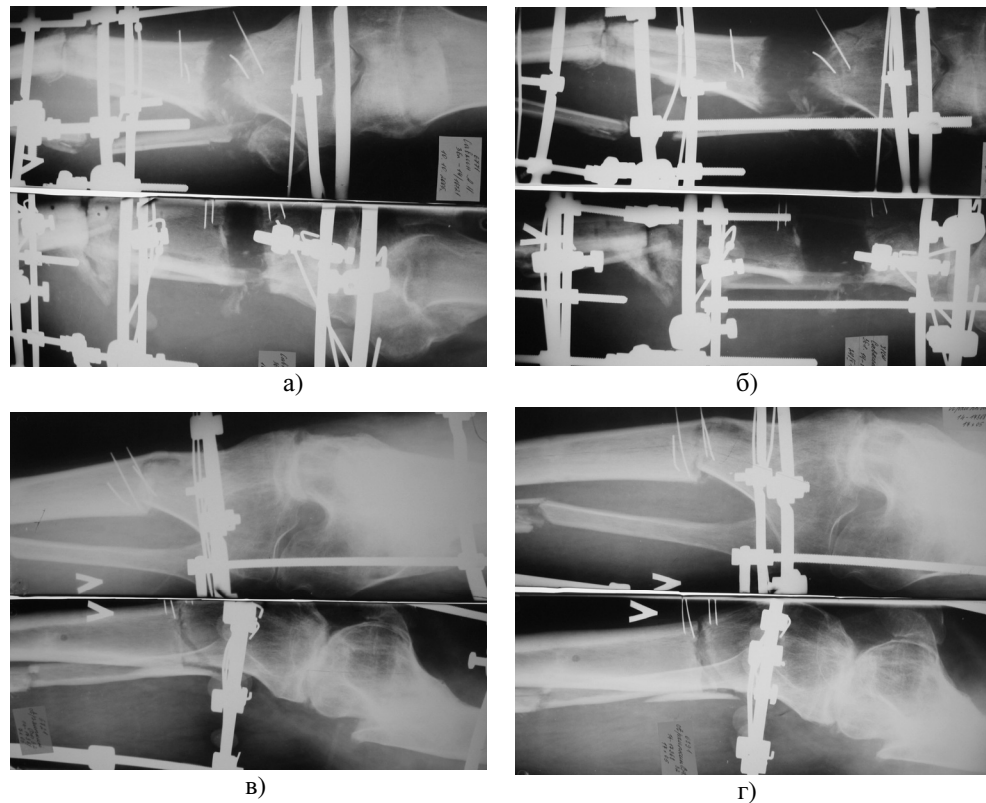


Рис. 8 Рентгеновские снимки больных Б и В: а) рентгеновские снимки удлиняемой конечности больного Б спустя два месяца после начала дистракции; б) рентгеновские снимки удлиняемой конечности больного Б спустя два месяца и 10 дней после начала дистракции; в) рентгеновские снимки удлиняемой конечности больного В спустя 10 дней после начала дистракции; г) рентгеновские снимки удлиняемой конечности больного В спустя 20 дней после начала дистракции

У больных с необходимостью удлинения конечности значения работы тока, замеренные в период дистракции (измерения проводились равномерно спустя сутки после осуществления дистракции), остаются примерно одинаковыми в течение всего периода, что говорит о том, что костный регенерат за сутки после дистракции восстанавливается до исходного состояния при начальном моменте дистракции.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что с помощью джоульметрического метода можно осуществлять ежесуточный контроль формирования костной ткани как при переломах костей, так и при удлинении конечности. По оценкам джоульметрических параметров можно определять оптимальный момент начала дистракции и ежесуточную величину дозированных однократных перемещений костных фрагментов. Установление зависимости джоульметрических параметров и формирующейся костной ткани позволяет существенно повысить качество оценки состояния костной ткани на протяжении периода лечения по сравнению с используемым для этого рентгеновским методом. Предлагаемый метод запатентован в РФ [17].

Список литературы

1. **Чиркова, А. М.** Репаративная регенерация и перестройка кости после разрыва дистракционного регенерата / А. М. Чиркова, С. А. Ерофеев // Гений ортопедии. – 1997. – № 4. – С. 39–42.
2. **Шрейнер, А. А.** Теоретические аспекты дистракционного остеосинтеза. Значение ритма дистракции / А. А. Шрейнер, С. А. Ерофеев, М. М. Щудло // Гений ортопедии. – 1999. – № 2. – С. 13–17.
3. **Наумов, А. Д.** Влияние разных ритмов дистракции на костеобразование, концентрацию циклических нуклеотидов и гемодинамику в удлиняемой кости / А. Д. Наумов, Н. И. Гордиевских, С. А. Ерофеев // Гений ортопедии. – 1996. – № 1. – С. 34–36.
4. **Илизаров, Г. А.** Зависимость репаративной регенерации кости и функционального состояния удлиняемой конечности от дробности дистракции (экспериментальное исследование) / Г. А. Илизаров, С. А. Ерофеев, А. А. Шрейнер // Гений ортопедии. – 1995. – № 1. – С. 8–12.
5. **Шевцов, В. И.** Осложнения при удлинении бедра в высокоточном автоматическом режиме / В. И. Шевцов, А. В. Попков, Д. А. Попков // Гений ортопедии. – 1997. – № 4. – С. 24–27.
6. **Попков, А. В.** Скорость удлинения конечности / А. В. Попков, Э. В. Бурлаков, Д. А. Попков // Гений ортопедии. – 1996. – № 1. – С. 44–46.
7. **Попков, А. В.** Оперативное удлинение бедра методом Г. А. Илизарова : учебно-методические разработки / А. В. Попков. – Курган : Российский научный центр «Восстановительная травматология и ортопедия» им. Г. А. Илизарова, 1994. – 19 с.
8. **Власов, П.** Рентгенодиагностика переломов скелета / П. Власов, О. Нечволодова // Медицинская газета. – 2003. – № 91. – С. 8–9.
9. **Попков, А. В.** Биомеханические аспекты адаптационно-восстановительных изменений в дистракционном регенерате кости / А. В. Попков, А. Д. Попков, В. А. Немков // Гений ортопедии. – 1996. – № 1. – С. 47–49.
10. **Ньюман, У.** Минеральный обмен кости / У. Ньюман ; пер. с англ. О. Я. Терещенко ; под ред. И. И. Демина. – М. : Изд-во иностр. литературы, 1961. – 270 с.
11. **Куфтырев, Л. М.** Динамика минерализации новообразованных участков кости при замещении оперативного дефекта берцовых костей удлинением проксимального отломка большеберцовой кости с образованием дополнительной зоны регенерации (экспериментальное исследование) / Л. М. Куфтырев, Н. В. Петровская, Д. Ю. Борзунов // Гений ортопедии. – 1999. – № 2. – С. 86–91.
12. **Ирьянов, Ю. М.** Пространственная организация и особенности минерализации регенератов, формирующихся при стабильной фиксации костных отломков аппаратом Илизарова / Ю. М. Ирьянов // Гений ортопедии. – 1998. – № 1. – С. 39–44.
13. **Ирьянов, Ю. М.** Пространственная организация костной ткани дистракционных регенератов по данным сканирующей электронной микроскопии / Ю. М. Ирьянов // Гений ортопедии. – 1998. – № 1. – С. 22–27.
14. **Ирьянов, Ю. М.** Пространственная организация микроциркуляторного русла в дистракционных регенератах / Ю. М. Ирьянов // Гений ортопедии. – 1996. – № 1. – С. 14–18.
15. **Свешников, А. А.** Плотность минеральных веществ в дистракционном регенерате при стимуляции регенерации по способу В. И. Швецова – А. В. Попкова / А. А. Свешников, А. В. Попков, Д. А. Попков [и др.] // Гений ортопедии. – 2001. – № 4. – С. 61–65.
16. **Герашенко, С. И.** Джоульметрия и джоульметрические системы: теория и приложение : монография / С. И. Герашенко. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2000. – 192 с.

17. Пат. 2264796 РФ, МКИ А 61 В 17/66. Устройство для контроля состояния дистракционного костного регенерата / С. И. Геращенко, А. И. Кислов, С. М. Геращенко, Н. Н. Янкина, А. С. Кибиткин, В. А. Спиридонов. – № 2003132627/14 ; заявл. 06.11.2003 ; опубл. 27.11.2005, Бюл. № 33.