

# БИОМЕХАНИКА И БИМЕДИЦИНСКИЙ ИНЖИНИРИНГ

---

УДК 531/534:[57+61]

**О.В. Чарнцева, А.А. Селянинов, А.М. Еловиков**  
**O.V. Charntseva, A.A. Selyaninov, A.M. Elovikov**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет  
Perm National Research Polytechnic University

## КИНЕТИКА ВОССТАНОВЛЕНИЯ СЛУХА ПОСЛЕ СТАПЕДОПЛАСТИКИ

## KINETICS OF REHABILITATION OF HEARING AFTER STAPEDOPLASTY

По данным различных источников, на слух приходится 16–20 % информации, которую воспринимает человек. Значительное снижение слуха лишает нас коммуникативной функции. Отосклероз – одно из частых заболеваний, которое лечится хирургическим путем с помощью стапедопластики. В работе рассматривается процесс восстановления слуха после стапедопластики у группы пациентов. Проведен статистический анализ на основе теории случайных процессов в условиях малых выборок. Получены графики зависимости математического ожидания, дисперсии и среднего квадратичного отклонения от времени для одного из показателей качества слуха.

**Ключевые слова:** стапедопластика, восстановление слуха, случайный процесс, статистический анализ, отосклероз.

According to various data, 16–20 % of the information perceived by the human is hearing. Significant decrease in hearing deprives the communicative function of people. Otosclerosis is one of the most common diseases, which are being treated surgically by means stapedoplasty. In this paper, the process of rehabilitation of hearing after stapedoplasty for a group of patients. A statistical analysis based on the theory of random processes in small samples is performed. Graphs of dependences of mathematical expectation, dispersion, and mean square deviation by time are obtained for one of the parameters of the quality of hearing.

**Keywords:** stapedoplasty, restore hearing, random process, statistical analysis, otosclerosis.

Без возможности слышать человек теряет возможность коммуникации и восприятия окружающего мира. Слух – это способность воспринимать звуковые колебания частотой определенного диапазона [10]. Звуковые волны от внешнего источника поступают в наружный слуховой проход через уш-

ную раковину, которая в норме вызывает колебания барабанной перепонки – кожной мембраны, натянутой на конце слухового прохода. Эти колебания, в свою очередь, передаются по подвижной цепи слуховых косточек: молоточку, наковальне и стремечку, расположенных в среднем ухе (рис. 1). Во время колебания слуховые косточки обрабатывают сложную кинематику движения [7, 10]. В зависимости от величины звукового давления стремя движется вперед и назад, вращается относительно продольной оси и поворачивает овальное окно – границу между средним и внутренним ухом. Эти движения вызывают вибрацию жидкости, которой заполнено внутреннее ухо. Вибрация жидкости улавливается эпителиальным образованием – кортиевым органом, являющимся частью спирали улитки [8].



Рис. 1. Косточки среднего уха: молоточек, наковальня, стремя

Фиксация (ограничение подвижности) стремени может привести к полной потере слуха. Так появляется заболевание отосклероз – своеобразный процесс, развивающийся в костной капсуле ушного лабиринта, заключающийся в разрастании губчатой ткани, чаще всего в области ниши овального окна (рис. 2). В результате кольцевая связка задубевает и становится плотной костью, пластинка стремечка оказывается замурованной в овальном окне и лишается своей подвижности. Поэтому звуковые колебания не передаются, что в конечном итоге приводит к тугоухости [8].

В некоторых случаях патологическое разрастание кости может распространиться и на другие отделы лабиринтной капсулы, в частности на канал улитки, и тогда нарушенной оказывается не только звукопро-

ведения, но и звуковосприятия. Таким образом, отосклероз обычно является одновременно заболеванием среднего и внутреннего уха [11].

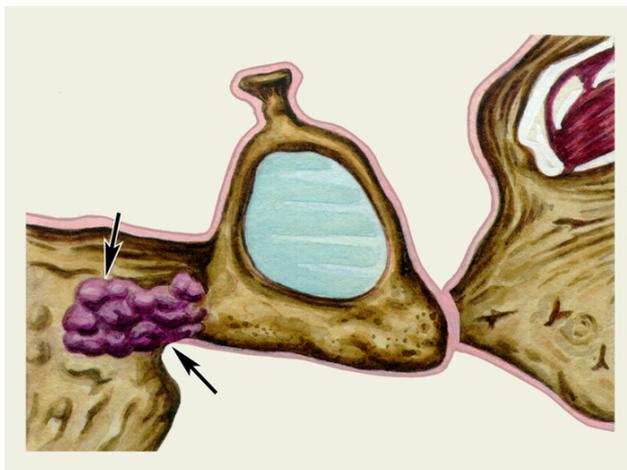


Рис. 2. Схематическое изображение стемени при отосклерозе (стрелками указан отосклеротический очаг в основании стемени)

В начале заболевания постепенно снижается слух и появляется шум в одном ухе, затем – в другом [8]. Отосклеротический процесс в большинстве случаев затрагивает оба уха. Отосклерозом чаще болеют женщины (63–84 %) [1], чем мужчины.

Основным методом хирургического вмешательства при отосклерозе является операция. Большим достижением оториноларингологии является хирургическое лечение тугоухости при отосклерозе. Распространение получили операции *стапедэктомии со стапедопластикой*, т.е. микрохирургическая операция на среднем ухе по удалению стемени и замене его протезом.

В клинике оториноларингологии Пермской государственной медицинской академии хирургическим лечением отосклероза занимаются уже более 40 лет. Последние 15 лет методом оперативного лечения тугоухости при данном заболевании считается шадящая поршневая стапедопластика. Особенностью данного вида оперативного вмешательства в отличие от стандартного является обязательное сохранение сухожилия стременной мышцы и суставной сумки наковальне-стремного сочленения. Другие типы вмешательств на стемени (поршневая стапедопластика, мобилизация стемени и т.п.) используются при невозможности проведения шадящего типа операции [1].

При операции на стемени применяют протезы из аутохряща, ногтевой пластины, полиэтилена, тефлона и других материалов. Тефлоновый протез, который используют в клинике оториноларингологии Пермской государственной медицинской академии, в частности отохирургом А.М. Еловиковым, пред-

ставляет собой жесткую стойку с небольшой головкой. В ходе операции стержень вставляется в отверстие, подготовленное в пластине овального окна.

Ранее в работе [4] было исследовано влияние механических и физических характеристик протеза на нижний спектр частот в случае жесткого и упругого крепления восстановленной мембраны на внешнем контуре.

В настоящее время большинство отохирургов для оценки результатов операции на стремени пользуются определением величины костно-воздушного интервала (КВИ), остающегося после операции. Расчеты аудиограмм производили по всем частотам, группируя их в диапазонах 0,5–1, 2–4 и 6–8 кГц.

Разработан целый класс кинетически моделируемых биомеханических случайных процессов [9]. Эти процессы моделируются кинетическим уравнением первого порядка.

Кинетические уравнения при возможности мониторинга параметров позволяют наблюдать за различными биомеханическими процессами, в результате чего, в частности, можно спрогнозировать время восстановления слуха для конкретного пациента. Для этого, по клиническим данным отохирурга А.М. Еловикова, следует провести кинетический анализ КВИ и на его базе стохастический анализ на основе теории случайных процессов.

**Материалы и методы.** По данным А.М. Еловикова, в период с 2001 по 2009 год проведено ретроспективное обследование группы пациентов (60 женщин) в возрасте от 31 до 35 лет с тугоухостью, обусловленной отсклеротической фиксацией стремени. Обследование и лечение пациентов проходило в клинике оториноларингологии Пермской государственной медицинской академии. Стапедопластика проводится под операционным микроскопом «Ортоп» при увеличении 8–14 крат. Для проведения оперативного вмешательства на среднем ухе по поводу отосклероза применяют местную анестезию [1]. Пациенты наблюдались в период от 1 месяца до 3 лет. В данной работе исследовался показатель КВИ с частотой 2–4 кГц, который является общепринятой характеристикой состояния слуха. Таблица значений показателей КВИ для данной группы пациентов после стапедопластики через 1, 12 и 36 месяцев ввиду больших размеров здесь не приводится.

**Статистический анализ эксперимента по восстановлению слуха после стапедопластики.** На основе значений для выбранной группы пациентов по показателю КВИ с частотой 2–4 кГц проведем статистический анализ в условиях малой выборки. Для определения выборочных аналогов воспользуемся соотношениями микростатистики [5]. Числовые характеристики определяются выражениями:

– для математического ожидания:

$$m_x(t_k) = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n}, \quad (1)$$

– для выборочной дисперсии:

$$D_x(t_k) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - m_x(t_k))^2}{n-1}; \quad (2)$$

– среднего квадратичного отклонения:

$$\sigma_x(t_k) = \sqrt{D_x(t_k)}, \quad (3)$$

где  $k = \overline{1,4}$ .

Корреляционная матрица имеет вид

$$\tilde{K} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \dots & K_{1k} \\ K_{21} & K_{22} & \dots & K_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_{k1} & K_{k2} & \dots & K_{kk} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где  $K_{kk} = M[(x_k - m_x(t_k))^2] = D_x(t_k)$ ,  $k = \overline{1,4}$ ;

$$K_{ij} = K_{ji} = M[(x_i - m_x(t_i))(x_j - m_x(t_j))], i, j = \overline{1,4}.$$

В нашем случае матрица имеет вид

$$\tilde{K} = \begin{bmatrix} 91,3 & 65,3 & 39,5 & 24,6 \\ \dots & 66,9 & 39,7 & 23 \\ \dots & \dots & 46,9 & 22,2 \\ \dots & \dots & \dots & 23,7 \end{bmatrix}.$$

Члены корреляционной матрицы отражают коррелированность случайных величин в системе, при этом по отношению к дисперсии они не превышают 95 %.

Значения числовых характеристик процесса восстановления слуха в определенных моменты времени приведены в таблице.

#### Экспериментальные характеристики случайного процесса восстановления слуха после стапедопластики

Период	$n$	$m_x(t)$ , дБ	$D_x(t)$ , дБ <sup>2</sup>	$\sigma_x(t)$ , дБ
П/О	60	10,1	91,3	9,5
1 мес.	59	5,9	66,9	8,2
12 мес.	57	5	46,9	6,8
36 мес.	43	3,3	23,7	4,9

По данным таблицы построим графики по экспериментальным точкам согласно пакету программ Advanced Grapher 2.2. На рис. 3, 4 показаны зависимости математического ожидания, дисперсии и среднего квадратичного отклонения случайного процесса восстановления слуха.

В статистическом анализе эксперимента по восстановлению слуха получаем, что математическое ожидание и среднее квадратичное отклонение после операции (рис. 3) в течение месяца резко улучшается, затем в период с 1 месяца до 3 лет идет постепенное улучшение слуха. При этом среднее квадратичное отклонение имеет достаточно большие разбросы по отношению к математическому ожиданию.

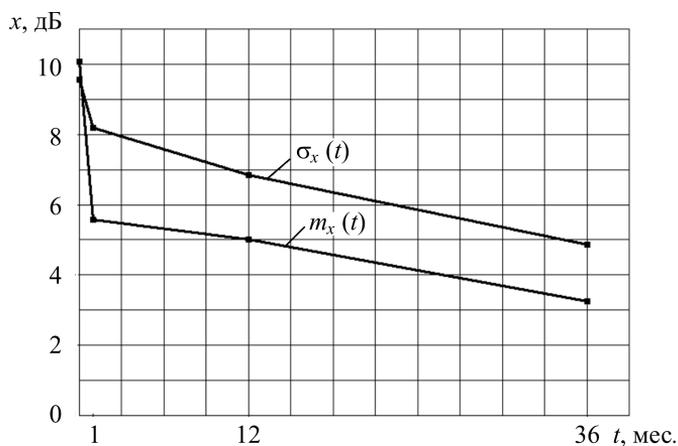


Рис. 3. Зависимости математического ожидания и среднего квадратичного отклонения как случайного процесса от времени

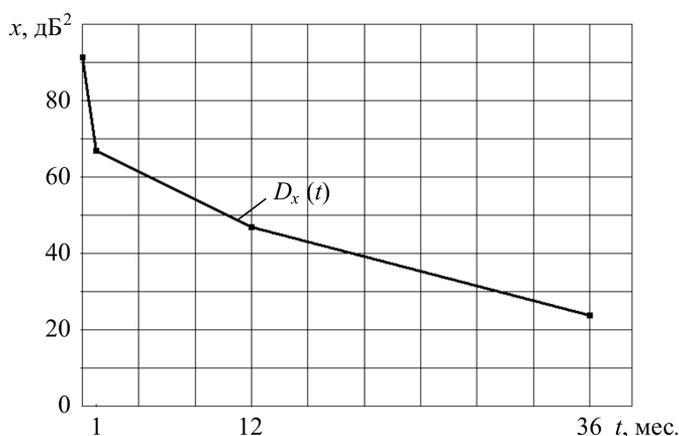


Рис. 4. Зависимости дисперсии как случайного процесса от времени

О качестве восстановления слуха после стапедопластики можно судить по соотношению среднего квадратичного отклонения и математического ожидания коэффициенту вариации:

$$V(t) = \frac{\sigma_x(t)}{m_x(t) \cdot \sqrt{n}} \cdot 100\%, \quad (5)$$

где  $n$  – число пациентов.

Получаем следующие результаты:  $V(0) = 12\%$ ,  $V(1) = 18\%$ ,  $V(12) = 18\%$  и  $V(36) = 22\%$ . Значения коэффициентов вариации получились небольшие.

Выборочная дисперсия определяет разброс значений КВИ при реализациях случайного процесса. На рис. 4 наблюдается уменьшение дисперсии со временем, а именно с 91,3 до 23,7 за 36 месяцев. Это уменьшение показывает достаточно хороший результат, отражающий стабильность восстановления слуха в рассмотренной группе пациентов.

#### **Выводы:**

1. При наблюдении в период от 1 месяца до 3 лет отмечен хороший результат по восстановлению слуха после стапедопластики.

2. Случайный процесс восстановления слуха после стапедопластики представлен системой случайных величин (по сечениям процесса). Произведена статистическая обработка в условиях малой выборки для одного из показателей качества слуха.

#### **Список литературы**

1. Еловиков А.М., Ворончина В.Н. Хирургическая реабилитация больных отосклерозом в Пермском крае // Вятский медицинский вестник. – 2008. – № 2. – С. 61–63.

2. Еловиков А.М., Подлужная М.Я. Распространенность и структура заболеваемости отосклерозом в Пермском крае // Медицинский альманах. – 2012. – № 2 (21). – С. 61–64.

3. Косяко С.Я., Пахилина Е.В., Федосеев В.И. Стапедопластика: одна технология, два типа протеза // Вестник оториноларингологии. – 2008. – № 1. – С. 42–46.

4. Михасев Г.И. Моделирование свободных колебаний звукопроводящей системы реконструированного среднего уха // Российский журнал биомеханики. – Т. 9, № 1. – С. 52–62.

5. Нейман Л.В. Анатомия, физиология и патология органов слуха и речи: учеб. пособие для студентов дефектологических факультетов пед. ин-тов. – 1970. – С. 184.

6. Письменный Д.Т. Конспект лекций по теории вероятностей, математической статистике и случайным процессам. – М.: Айрис-пресс, 2013. – 288 с.

7. Резимов А.Н. Краткий курс медицинской и биологической физики: лекции и семинары. – М.: Изд-во Запорож. гос. мед. ун-та, 2001. – 383 с.

8. Выбор параметров протеза стремени при стапедопластике на основе собственных частот / А.А. Селянинов, А.М. Еловиков, Т.С. Бородулина, Р.М. Подгаец // Российский журнал биомеханики. – 2009. – Т. 13, № 14 (46). – С. 42–53.

9. Селянинов А.А. Класс кинетически моделируемых биомеханических случайных процессов // Российский журнал биомеханики. – Т. 16, № 4. – С. 22–35.

10. Селянинов А.А., Нигматуллина С.В. Собственные частоты имплантата стремени поршневого типа // Российский журнал биомеханики. – 2012. – № 3. – С. 135–148.

11. Селянинов А.А. Статистическая механика и теория надежности. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – 201 с.

12. Федорова В.Н., Степанова В.Н. Краткий курс медицинской и биологической физики с элементами реабилитологии: лекции и семинары. – М.: ФИЗМАТЛИТ. – 2005. – 113 с.

Получено 08.09.2015

**Чарнцева Ольга Валентиновна** – магистрант, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, факультет прикладной математики и механики, гр. БМ-14-1м, e-mail: Olechka\_\_90@mail.ru.

**Селянинов Александр Анатольевич** – доктор технических наук, профессор кафедры теоретической механики и биомеханики, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, факультет прикладной математики и механики, e-mail: Prof.Selyaninov@yandex.ru.

**Еловиков Алексей Михайлович** – кандидат медицинских наук, доцент кафедры оториноларингологии Пермский государственный медицинский университет им. Е.А. Вангера, e-mail: aleks.elovikov@yandex.ru.