

- [3] Лурье А. И. Теория упругости. М.: Наука, 1970. 940 с.
- [4] Жилин П. А. Рациональная механика сплошных сред. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. 584 с.
- [5] Победря Б. Е., Георгиевский Д. В. Основы механики сплошной среды. М.: Физматлит, 2006. 272 с.
- [6] Димитриенко Ю. И. Нелинейная механика сплошной среды. М.: Физматлит, 2009. 624 с.
- [7] Нигматулин Р. И. Механика сплошной среды. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2014. 528 с.

Математическое моделирование биомеханической системы среднего уха человека

Босьяков С.М.,¹ Малец Е.Л.,² Петрова Л.Г.³

bosiakov@bsu.by, malets-al@yandex.by, petrova_l@tut.by

¹Белорусский государственный университет,

220030, Республика Беларусь, Минск, пр. Независимости, 4,

²Республиканский научно-практический центр оториноларингологии,

220004, Республика Беларусь, Минск, ул. Сухая, 8,

³Белорусский государственный медицинский университет,

220083, Республика Беларусь, Минск, пр. Дзержинского, 83

Аннотация. В настоящей работе представлены результаты математического моделирования колебательной системы среднего уха человека, подвергнутого тотальной тимпанопластике и ossiculoplastике, трансплантации тимпанальной мембраны после удаления ретракционного кармана, а также аэрации барабанной полости в условиях хронической дисфункции слуховой трубы. Полученные результаты позволяют сопровождать и планировать лечение потери слуховой проводимости, связанной с перфорациями тимпанальной мембраны, возникновением различных отитов, пороков развития или неправильным формированием.

Ключевые слова: математическое моделирование, среднее ухо, тимпанальная мембрана, аэрация барабанной полости, тимпанопластика, хрящевой трансплантат.

Введение. Моделирование биомеханической системы среднего уха и механизма слуховой проводимости в нормальном и патологических состояниях относится к одной из основных задач медицинской биомеханики. Результаты такого моделирования позволяют прогнозировать особенности их функционирования, а также формулировать рекомендации при назначении лечения, по выполнению профилактических мероприятий и послеоперационной реабилитации пациентов. В настоящей работе представлены результаты определения собственных частот свободных колебаний среднего уха человека, подвергнутого тотальной тимпанопластике и ossiculoplastике, с учетом подвижности подножной пластины стремени, оценки геометрических параметров хрящевых

ванием протеза по его контуру. Из всех форм колебаний пластинки рассматриваются только те, которые сопровождаются образованием не более чем одного узлового (неподвижного) диаметра. Это обусловлено тем, что формы колебаний с образованием двух и более узловых диаметров на пластинке не стимулируют движение присоединенного протеза [1].

Установлено, что при увеличении модуля упругости трансплантата и жесткости связки овального окна собственные частоты свободных колебаний реконструированной системы среднего уха также возрастают. В то же время, изменение модуля упругости трансплантата оказывает более существенное влияние на изменение значений собственных частот, чем изменение жесткости овального окна.

Оценка толщины хрящевого трансплантата. Разработка твердотельных моделей тимпанальной мембраны, молоточка, наковальни и стремени выполнена на основании томографических данных с учетом того, что тимпанальная мембрана имеет слоистую структуру и неравную толщину областей *pars tensa* и *pars flaccida* [2]. Элементы модели представлены на рис. 2.

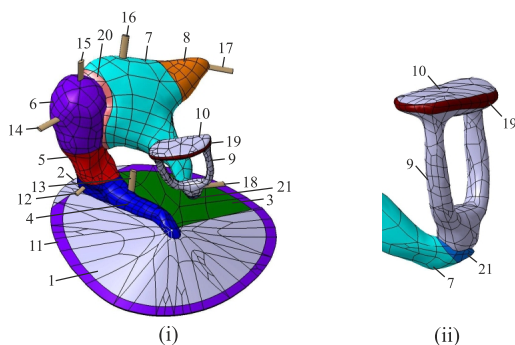


Рис. 2. Твердотельная модель среднего уха (i) и область наковальне-стремени сустава (ii): 1 — *pars tensa*; 2 — задневерхний квадрант; 3 — *pars flaccida*; 4, 5 и 6 — рукоятка, шейка и головка молоточка; 7 — тело наковальни; 8 и 9 — короткий и длинный отростки наковальни; 10 — стремя; 11 — основание подножной пластины стремени; 12 — тимпанальное кольцо; 13 — *tensor tympani*; 14, 15 и 16 — передняя, латеральная и верхняя молоточковые связки; 17 и 18 — передняя и задняя связки наковальни; 19 и 20 — сухожилие и кольцевая связка стремени; 21 и 22 — молоточковонаковальный и стремянаковальный суставы.

Толщина хрящевого трансплантата определяется из условия равенства частот свободных колебаний для соответствующих главных форм колебаний среднего уха в норме и среднего уха с установленным на задневерхний квадрант

хрящевым трансплантатом различной толщины. Установлено, что при хирургической операции по восстановлению целостности тимпанальной мембраны наиболее эффективно использовать хрящевой трансплантат толщиной около $0,193 \pm 0,031$ мм.

Моделирование аэрации полостей среднего уха. Параметризованная модель среднего уха, соответствующая детям двух и двенадцати лет, включающая сосцевидный отросток, барабанную полость, колебательную систему среднего уха и слуховую трубу, представлена на рис. 3.

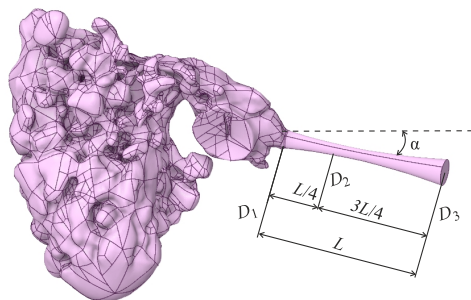


Рис. 3. Твердотельная модель среднего уха, параметризованная по углу α наклона слуховой трубы и ее диаметрам на уровнях D_1 , D_2 и D_3 (L — длина слуховой трубы).

Расчет распределения давления и линий тока воздуха в сосцевидном отростке, барабанной полости и слуховой трубе осуществлялся для случаев в норме, при патологии проходимости евстахиевой трубы, уменьшающей величины полуосей эллиптических поперечных сечений на трех различных уровнях трубы в два, три и десять раз, патологии сосцевидного отростка, приводящей к уменьшению площади его поверхности на 30% по отношению к площади поверхности в норме.

Заключение. Установленные закономерности изменения спектров частот свободных колебаний среднего уха после установки хрящевого трансплантата и протеза среднего уха, а также закономерности распределения давления в полостях среднего уха при дисфункции слуховой трубы и сосцевидного отростка позволяют планировать хирургические операции по улучшению слуховой проводимости.

Работа выполнена в рамках задания 1.7.1.4 ГПНИ «Конвергенция».

Литература

- [1] Mikhasev G., Ermochenko S., Bornitz M. On the strain-stress state of the reconstructed middle ear after inserting a malleus-incus prosthesis // Math. Med. Biol. 2010. Vol. 27. No. 4. P. 289–312.
- [2] Mikhasev G., Bosiakov S., Petrova L., Maisyuk M., Yurkevich K. Assessment of eigenfrequencies of the middle ear oscillating system: effect of the cartilage transplant // Dyn. Sys. Mod. 2016. Vol. 181. P. 243–255.

Санкт–Петербургский государственный университет

Saint–Petersburg State University

Х Поляховские чтения

Материалы

международной научной конференции по механике,
23–27 сентября 2024 г., Санкт–Петербург, Россия

X Polyakhov's Reading

Proceedings

of the International Scientific Conference on Mechanics,
September 23–27, 2024, Saint–Petersburg, Russia

Санкт–Петербург

2024