

**В.М. Тверье, Р.М. Подгаец, Л.В. Дьячкова**  
**V.M. Tverier, R.M. Podgaets, L.V. Diachkova**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет  
Perm National Research Polytechnic University

## **БИОМЕХАНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ВСКАРМЛИВАНИЯ**

### **BIOMECHANICAL MODELING OF BOTTLE FEEDING**

Представлена постановка задачи о биомеханическом моделировании процесса искусственного вскармливания. Вскармливание детей раннего возраста с точки зрения приложения нагрузки на жевательный аппарат влияет на формирование всей зубочелюстной системы и ее основных функций: сосания, дыхания, глотания и жевания. Моделирование процесса кормления ребенка через соску позволит максимально приблизить условия искусственного вскармливания к условиям естественного.

The article states the problem of biomechanical modeling of bottle feeding. Feeding of infants influences on the forming and development of the all dentofacial system and its main functions: sucking, breathing, swallowing and chewing and it depends on the loading of the masticatory apparatus. Modeling of infants feeding with the teat allows to approximate the conditions of bottle feeding to breastfeeding.

**Ключевые слова:** естественное вскармливание, искусственное вскармливание, соска, давление, расход.

**Keywords:** breast feeding, bottle feeding, teat, pressure, flow rate.

Вскармливание детей раннего возраста является важной проблемой современности. Многие матери, зная о большем количестве заменителей грудного молока, не задумываются о важности кормления ребенка грудью, поэтому в последнее время большое количество детей вскармливается искусственно [1]. Исследования показывают, что процесс искусственного вскармливания не обеспечивает необходимой функциональной нагрузки на костно-мышечный аппарат челюстно-лицевой области ребенка [2–6]. Использование соски может привести к различным нарушениям при жевании, дыхании, глотании [2]. Тип вскармливания детей раннего возраста является одним из наиболее значимых факторов развития зубочелюстной системы ребенка и его организма в целом [7, 8, 5].

Избежать отрицательного влияния искусственного вскармливания на формирование зубочелюстной системы или уменьшить его позволит правильный подбор соски или корректировка ее формы и размеров на основе результатов, полученных при моделировании искусственного вскармливания.

Биомеханическое моделирование искусственного вскармливания позволит определить его недостатки по сравнению с естественным вскармливанием и внести необходимые коррективы в этот процесс.

**Моделирование процесса искусственного вскармливания.** Кормление из бутылочки – довольно сложный нестационарный процесс. При моделировании искусственного вскармливания [9] рассматривается область, в которую включена ротовая полость ребенка, отверстие в соске и соска. Непосредственно бутылочка не рассматривается (так как размеры бутылочки на несколько порядков больше размеров отверстия, и течение будет определяться только близлежащей зоной – соской). Рассматривается стандартная соска с одним круглым отверстием. Основными параметрами этой области являются размер отверстия в соске  $d$ , толщина соски  $h$ , длина всей области, в которую входит длина соски и ротовая полость ребенка (рис. 1).

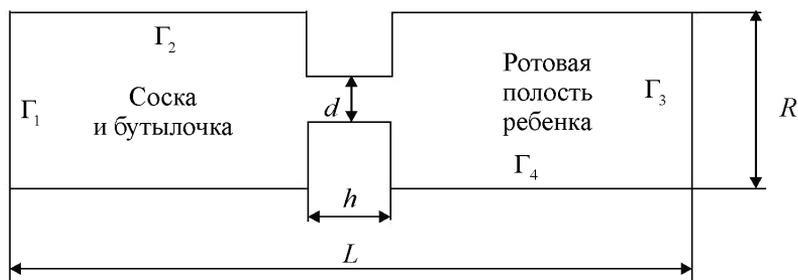


Рис. 1. Рассматриваемая область для модели искусственного вскармливания

Из экспериментальных данных известно об изменении давления во времени внутри ротовой полости ребенка при естественном вскармливании (рис. 2). Предполагается, что нагрузка при искусственном вскармливании должна быть такая же либо максимально приближена к нагрузке при естественном вскармливании. Вследствие чего на границе задается экспериментально известное изменение давления внутри ротовой полости ребенка при вскармливании грудью [10]. Давление в бутылочке считаем равным атмосферному, так как ребенок при глотании расслабляет губы и разжимает десны, и воздух периодически поступает в бутылочку.

Рассматривается течение жидкости в определенный промежуток времени  $t \in (0, T)$  в области с определенными параметрами ( $d, h, L$ ), на границах

этой области задано изменение давления. Изменяя значение диаметра отверстия, найдем расход молока  $\bar{Q}(t)$  в зависимости от времени, интегральная величина которого должна минимально отличаться от экспериментально полученного значения, известного для естественного вскармливания  $\bar{Q}^*(t)$  (рис. 3) [7, 10].

$$\int_0^T \left[ \bar{Q}(t) - \bar{Q}^*(t) \right]^2 dt \rightarrow \min_{h,d,v}.$$

При моделировании искусственного вскармливания необходимо решить задачу гидродинамики для нестационарного течения вязкой несжимаемой жидкости через короткий капилляр, так как толщина стенки соски и диаметр отверстия в соске – величины одного порядка. Течение такого вида неламинарное, имеет области около сужения, где образуется вихрь, и отличается от течения Пуазейля [11, 12]. Упругостью соски пренебрегаем, так как влияние этого параметра на течение незначительно.

**Постановка задачи.** Рассматривается круглая цилиндрическая трубка с симметричным прямоугольным сужением. Жидкость предполагается несжимаемой, ньютоновской, вязкой [3]. Течение в замкнутой области через короткий капилляр описывается уравнением Навье – Стокса.

Уравнение движения жидкости и уравнение неразрывности имеют вид:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + (V \cdot \nabla)V = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 V,$$

$$\nabla \cdot V = 0,$$

где  $V(t, r, z)$  – вектор скорости течения жидкости;  $\rho$  – плотность жидкости;  $p(t, r, z)$  – давление;  $\nu$  – кинематическая вязкость жидкости.

Граничные условия на входе и выходе задаются как разница давлений, а также учитывается прилипание молока к стенкам трубы:

$$V|_{\Gamma_2, \Gamma_4} = 0,$$

$$p|_{\Gamma_1} = P_{\text{атм}},$$

$$p|_{\Gamma_3} = P(t).$$

В начальный момент времени скорость равна нулю, давление равно атмосферному:

$$V|_{t=0} = 0,$$

$$p|_{t=0} = P_{\text{атм}}.$$

При решении задачи используются известные данные: вязкость грудного молока  $\nu = 2 \cdot 10^{-3}$  Па·с; плотность грудного молока  $\rho = 1,027$  г/см<sup>3</sup>.

В работе [13] было установлено, что питательные молочные смеси относятся к ньютоновским жидкостям. Пределы изменения вязкости смеси детского питания, грудного и коровьего молока не превышают 7%. Данный диапазон изменения вязкости почти не влияет на основные параметры течения.

Ранее проведенные эксперименты по изменению параметров расчетной области [14] позволили определить оптимальные значения:  $D_1 = D_2 = 9$  мм – диаметры входного и выходного отверстия,  $L_1 = 35$  мм – длина соски,  $L_2 = 15$  мм – ротовая полость ребенка.

Нагрузка при искусственном вскармливании должна быть такая же, как при кормлении грудью, или же максимально близкая к ней, поэтому на границе задается экспериментально известное изменение давления внутри ротовой полости у ребенка при естественном вскармливании [10] (см. рис. 2).

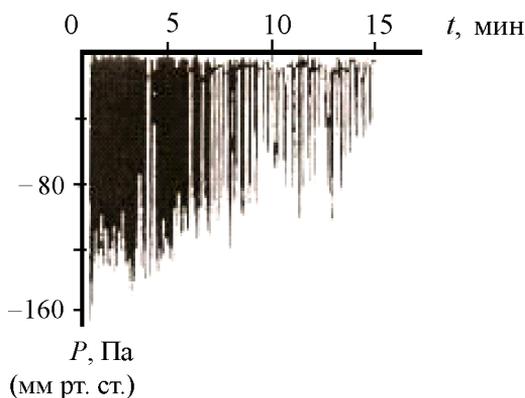


Рис. 2. График зависимости давления внутри ротовой полости у ребенка при естественном вскармливании [10]

Подчеркнем, что давление в бутылочке можно считать равным атмосферному, так как воздух периодически поступает в бутылочку.

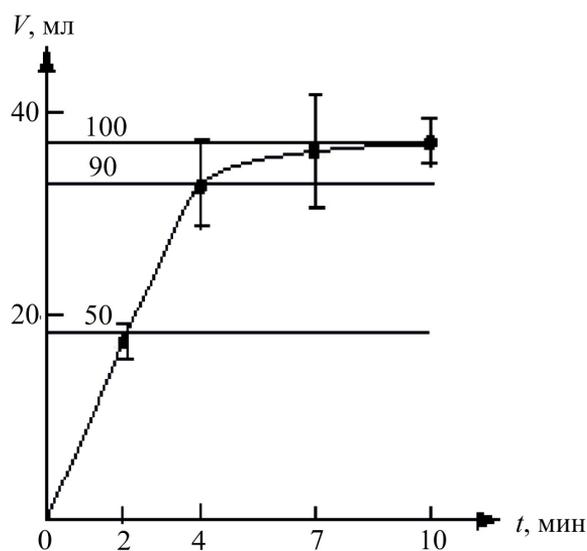


Рис. 3. Объем молока, высосанного младенцем при естественном вскармливании в зависимости от времени [7]

Решение задачи было получено численно с помощью программного пакета COSMOSFloWorks SolidWorks. Ранее проводились расчеты тестовых задач для оценки точности решения. Решалась задача о течении молока в молочном протоке. Полученные результаты позволили сделать вывод, что численное решение является достаточно точным и программный пакет SolidWorks может быть использован для решения более сложных задач о течении жидкости.

**Построение модели искусственного вскармливания с помощью программного пакета SolidWorks.** Для расчета модели искусственного вскармливания была построена замкнутая область, включающая в себя два цилиндра, соединенных между собой коротким капилляром (рис. 4).



Рис. 4. Расчетная область для модели искусственного вскармливания

Для решения задачи использовались исходные данные, приведенные ранее (геометрические параметры цилиндрической области, вязкость и плот-

ность молока). При варьировании диаметра и длины отверстия были определены наиболее точные значения:  $d = 0,3$  мм,  $h = 0,9$  мм.

Геометрическая модель имеет область сужения, короткий капилляр, где для точного решения необходимо произвести разбиение локальной сеткой (рис. 5).

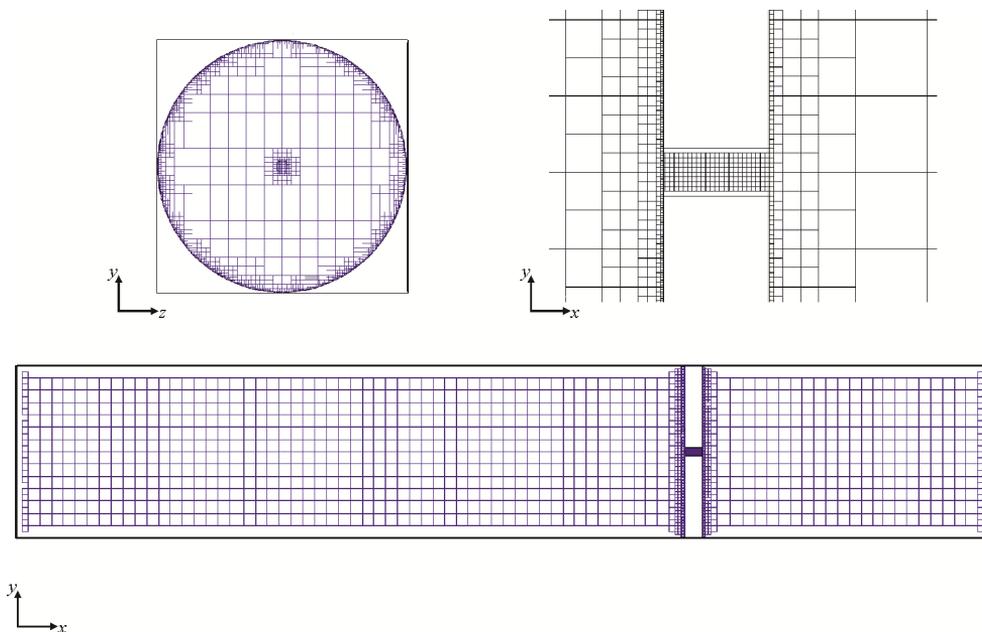


Рис. 5. Разбиение области расчета базовой и локальной сеткой

На рис. 6 представлено распределение линий тока скоростей течения жидкости в расчетной области. В данной задаче течение жидкости определяется лишь размерами области сужения. Значения параметров капилляра будут определять основные энергосиловые характеристики модели искусственного вскармливания, что позволит подбирать оптимальные размеры соски.

При численном решении данной задачи, с заданными выше параметрами и условиями, были получены следующие результаты:  $u_{z\max}$  – максимальная скорость по оси  $z$ ,  $u_{z\max} = 4073,4$  мм/с;  $Q$  – секундный объемный расход молока,  $Q = 376,2$  мм<sup>3</sup>/с.

Полученные результаты совпадают с результатами аналитического решения этой задачи. Исследования [3] говорят о том, что пищевая фаза кормления составляет лишь первые 10 мин, причем 50 % молока ребенок получает в первые 3 мин кормления и 90 % – за 8 мин кормления.

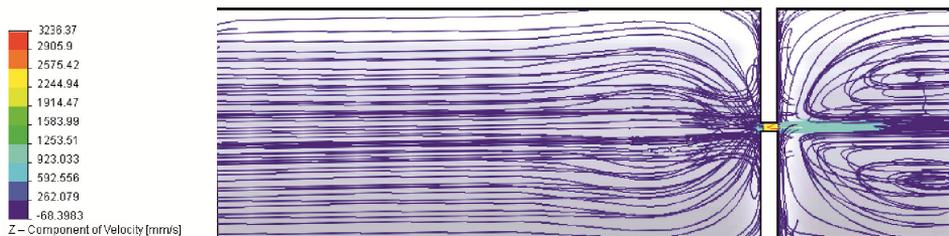


Рис. 6. Распределение линий тока скоростей в расчетной области

Секундный объемный расход молока за первые две минуты кормления меняется от 0 до  $376,2 \text{ мм}^3/\text{с}$ . После двух минут кормления течение устанавливается, расход молока становится постоянным и равен  $376,2 \text{ мм}^3/\text{с}$ . Полученный результат соответствует физиологическим данным и отличается от результатов аналитического решения не более чем на 10 %.

Для нестационарного течения молока в молочном протоке были получены результаты для скорости выведения молока. Скорость изменялась от 0 до  $4327,18 \text{ мм/с}$  и далее выходила на стационарное значение. Таким образом, скорость, полученная при моделировании искусственного вскармливания, отличается от параметров естественного вскармливания не более чем на 5 %, что является допустимой погрешностью.

Построенная модель искусственного вскармливания позволила подробно изучить характер течения молока в области с локальным сужением. В дальнейшем планируется построить аналитическую зависимость функции объема жидкости при искусственном вскармливании  $\tilde{V}(t, d, h)$ , которая позволит определить объем молока  $\tilde{V}$ , получаемый ребенком при искусственном вскармливании в зависимости от параметров отверстия в соске и времени кормления.

### Список литературы

1. Аверьянова Н.И., Гаслова А.А. Как воспитать здорового ребенка: монография. – Пермь, 2001. – 187 с.
2. Ахмедов А.А., Гусейнов Е.Г., Аскеров С.Б. Частота зубочелюстных аномалий у детей, находившихся на искусственном вскармливании // Стоматология. – 1986. – № 1. – С. 79–81.
3. Биомеханика вскармливания детей раннего возраста / М.И. Булгакова, Е.Ю. Симановская, Ю.И. Няшин, В.М. Тверье // Российский журнал биомеханики. – 2003. – Т. 7, № 4. – С. 9–21.
4. Кузьменко Л.П. Сосательный рефлекс у новорожденных // Педиатрия. – 1957. – № 11. – С. 22–27.

5. Сравнительное исследование грудного и искусственного вскармливания детей методом ультразвукового сканирования / Е.В. Финадеева, И.В. Дворяковский, О.А. Сударова, М.С. Кулагин // *Стоматология*. – 1990. – № 2. – С. 70–73.

6. Биомеханическое моделирование функции молочной железы / М.И. Шмурак, В.М. Тверье, Е.Ю. Симановская, Ю.И. Няшин // *Российский журнал биомеханики*. – 2004. – Т. 8, № 3. – С. 9–18.

7. Lucas A., Lucas P.J., Baum J.D. Pattern of milk flow in breast-fed infants // *The Lancet Ltd.* – 1979. – P. 57–58.

8. Дятлов С.А. О силе сосания новорожденного и об аппарате для определения этой силы // *Педиатрия*. – 1953. – № 2. – С. 33–36.

9. Биомеханическое моделирование искусственного вскармливания детей младшего возраста / В.М. Тверье, М.И. Шмурак, Е.Ю. Симановская, Ю.И. Няшин // *Российский журнал биомеханики*. – 2007. – Т. 11, № 3. – С. 54–61.

10. Sucking pressure and its relationship to milk transfer during breastfeeding in humans / C.R. Prieto, H. Cardenas, A.M. Salvatierra, C. Boza, C.G. Montes, H.B. Croxatto // *Journal of Reproduction and Fertility Ltd.* – 1996. – P. 69–74.

11. Lee J.S., Fung Y.C. Flow in locally constricted tubes at low Reynolds numbers // *Journal of Applied Mechanics*. – 1970. – March. – P. 9–16.

12. Three-dimensional simulation of steady flow past a partial stenosis / R.J. Liou, M.E. Clark, J.M. Robertson, L.C. Cheng // *J. Biomechanics*. – 1981. – Vol. 14, № 5. – P. 325–337.

13. Экспериментальное определение реологических свойств продуктов питания детей раннего возраста / В.М. Тверье, М.И. Шмурак, Ю.И. Няшин, Е.Ю. Симановская, А.В. Лебедев // *Российский журнал биомеханики*. – 2008. – Т. 12, № 2. – С. 23–31.

14. Методика определения параметров искусственного вскармливания детей на основе биомеханического моделирования / М.И. Шмурак, В.М. Тверье, Ю.И. Няшин // *Российский журнал биомеханики*. – 2009. – Т. 13, № 4. – С. 54–64.

Получено 4.11.2013

**Тверье Виктор Моисеевич** – кандидат технических наук, доцент, ПНИПУ, ФПММ, e-mail: [tverier@perm.ru](mailto:tverier@perm.ru).

**Подгаец Роман Михайлович** – кандидат технических наук, профессор, ПНИПУ, ФПММ, e-mail: [romanpodgaets@yandex.ru](mailto:romanpodgaets@yandex.ru).

**Дьячкова Любовь Валентиновна** – магистрант, ПНИПУ, ФПММ, гр. БМ-12-1м, e-mail: [lcl-ka@inbox.ru](mailto:lcl-ka@inbox.ru).