

УДК 531/534: [57+61]

## **БИОМЕХАНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ВСКАРМЛИВАНИЯ ДЕТЕЙ РАННЕГО ВОЗРАСТА**

**В.М. Тверье\*, М.И. Шмурак\*, Е.Ю. Симановская\*\*, Ю.И. Няшин\***

\* Кафедра теоретической механики Пермского государственного технического университета, Россия, 614990, Пермь, Комсомольский проспект, 29, e-mail: shmurak@permonline.ru

\*\* Кафедра детской стоматологии и ортодонтии Пермской государственной медицинской академии имени академика Е.А. Вагнера, Россия, 614990, Пермь, ул. Куйбышева, 39

**Аннотация.** Вскармливание детей раннего возраста с точки зрения приложения нагрузки на жевательный аппарат определяет формирование всей зубочелюстной системы и ее основных функций: сосания, дыхания, глотания и жевания. Экспериментально доказано, что искусственное вскармливание значительно отличается от естественного и не дает необходимой функциональной нагрузки на челюстно-лицевую область. Моделирование процесса кормления ребенка через соску позволит максимально приблизить условия искусственного вскармливания к условиям естественного. В работе представлена постановка задачи для моделирования искусственного вскармливания с целью приблизить биомеханические условия последнего к условиям функционирования зубочелюстной системы при естественном вскармливании.

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

### **Введение**

В настоящее время большинство детей раннего возраста вскармливается искусственно [7]. Исследования показали, что искусственное вскармливание не обеспечивает необходимой функциональной нагрузки на костно-мышечный аппарат челюстно-лицевой области ребенка [9, 10, 13–15]. Использование соски может привести к различным нарушениям при жевании, дыхании, глотании [14]. Искусственное вскармливание является одной из причин возникновения зубочелюстных аномалий [9].

На сегодняшний день соски и бутылочки очень разнообразны по форме, изготовлены из современных материалов. Практически у всех производителей имеется градация сосок для новорожденных, для детей от трех и от шести месяцев. Соски, как правило, изготавливаются из латекса и силикона. Однако нет никаких данных о регламентации диаметра отверстия в сосках и об использовании сосок для ослабленных и недоношенных детей.

В доступной литературе исследования для искусственного вскармливания обычно имеют эмпирический или качественный характер [1, 4–6, 8, 12–14], поэтому математическое моделирование позволит изучить данный процесс более точно и

подробно. Полученные результаты могут быть предложены производителям сосок для их усовершенствования.

### **Искусственное вскармливание**

Тип вскармливания детей раннего возраста является одним из наиболее значимых факторов развития зубочелюстной системы ребенка и его организма в целом. Экспериментально в клинических условиях доказано, что процесс искусственного вскармливания сильно отличается от процесса естественного [4, 12, 14].

Сосание при грудном вскармливании представляет собой ритмичный процесс, при котором за каждым сосательным движением практически без интервала следует глотание (соотношение 1:1 или 2:1) [14]. Выделяют следующие фазы сосания при естественном вскармливании:

- первая фаза – всасывание соска, увеличение его, перемещение нижней челюсти вперед и постепенное сжатие челюстей. В результате этого происходит максимальное увеличение соска, открываются молочные ходы, почти полностью сжимается сосок у шейки, начинает накапливаться молоко в пространстве ротовой полости, которое ограничивается сзади соединением мягкого неба с корнем языка;
- вторая фаза – высасывание молока, которое осуществляется перистальтическими движениями языка и опусканием его корня, в результате чего создается отрицательное давление в полости рта. Во время этой фазы наблюдали следующие изменения: перистальтические, выдавливающие движения языка, поднятие и удлинение мягкого неба, опускание корня языка;
- третья фаза – в открывшееся пространство глотки под влиянием разницы давления устремляется молоко, как накопившееся во рту, так и из молочных ходов. Вслед за этим происходит глотание;
- четвертая фаза – мягкое небо опускается, корень языка поднимается, сосок укорачивается и практически не сжимается, нижняя челюсть устанавливается в положение физиологического покоя, наступает как бы фаза отдыха, но затем быстро происходит обратное всасывание соска и начинается первая фаза.

В грудном вскармливании участвуют целые группы мышц ребенка, губы, язык, небо, активно работает нижняя челюсть, что является биомеханическим стимулом для развития всей зубочелюстной системы.

Искусственное вскармливание не обеспечивает необходимой функциональной нагрузки на костно-мышечный аппарат челюстно-лицевой области, что отражается на росте нижней челюсти, снижении тонуса жевательных мышц, мышц приротовой области и языка. В процессе искусственного вскармливания может сформироваться неправильный стереотип функции глотания, развиться парафункция языка. Быстрый прием пищи из бутылочки не обеспечивает удовлетворения сосательного рефлекса и приводит к формированию вредных привычек (сосание пальцев и языка), которые в свою очередь нарушают равномерный рост челюстей и вызывают развитие зубочелюстных аномалий [9].

В процессе искусственного вскармливания, в отличие от естественного, изменяются фазы процесса сосания, характер движения и взаимоотношения органов полости рта, ритм сосания и глотания имеют значительные отличия. Ритмичность сосательных и глотательных движений сохраняется (соотношение 1:1), что

соответствует данному показателю при кормлении грудью, но частота их заметно увеличивается.

Акт сосания при искусственном вскармливании определяется следующими характеристиками: размер и материал соски, количество и диаметр отверстий, место положения отверстий, размер, форма и материал бутылочки.

При искусственном вскармливании не удается проследить ни одну из фаз сосания, наблюдаемых при естественном вскармливании. Глотание у детей, у которых отверстие в соске слишком большое, носит судорожный характер в связи с тем, что объем жидкости при одном глотании превышает оптимальный, в результате чего ребенок не столько сосет (а точнее, не успевает сосать), сколько просто проглатывает свободно поступающую и наполняющую рот смесь. Поэтому смесь вытекает из углов рта. Кроме того, движения языком имеют большую амплитуду и носят размашистый характер, а сильный ток жидкости не дает возможности выполнить языком перистальтическое движение. Здесь уже работают лишь мышцы щёк и сжимаются челюсти.

Конец очень большой соски, особенно у детей с малой массой, выходит за пределы твердого неба и отодвигает мягкое небо вверх. Такое движение не позволяет замкнуть ротовое пространство сзади путем смыкания корня языка и опущенного мягкого неба, как это происходит в первой фазе при грудном вскармливании. Ребенок в целях «самозащиты» от захлебывания приспособляется, выполняя движения языком вперед – назад, сильно выдвигая кончик языка за десневые валики, чтобы образовать «желоб», через который смесь из соски выливается в ротоглотку.

При динамическом наблюдении кормления ребенка через молочную соску с маленьким отверстием отличия от естественного вскармливания заключаются в менее ритмичном характере сосания из-за необходимости его прерывания в момент полного опадания стенок соски. Это происходит в результате засорения отверстия или образования разрежения в бутылочке, что делает дальнейшее сосание невозможным. Поэтому ребенок полностью выпускает соску и ждет, когда она вновь наполнится.

При искусственном вскармливании отсутствует необходимая функциональная нагрузка. По сравнению с естественным вскармливанием время кормления детей при использовании молочных сосок с большим отверстием сокращается с 25 до 5 мин., быстрое кормление и быстрое поступление пищи в желудок может сопровождаться неполным удовлетворением сосательной функции.

Построение модели искусственного вскармливания позволит максимально приблизить условия этого процесса к условиям грудного кормления. Для его моделирования следует рассмотреть течение жидкости из бутылочки через соску в ротовую полость ребенка. При кормлении основным фактором, определяющим течение молока, является разница давлений [5, 8]. Ребенок, безусловно, сжимает десневыми валиками и губами сосок и соску для удержания их во рту или при глотании, но на поток жидкости это влияет незначительно. Разрежение в ротовой полости ребенка образуется главным образом в результате перистальтических движений языка. Ряд исследований, проведенных для определения давления во рту ребенка при сосании, определили эту величину в среднем как 2–6 кПа [1, 6, 15], а максимальные амплитудные значения достигают 27 кПа [5]. Кроме того, известно изменение давления во времени при естественном вскармливании [5].

Экспериментально установлено, что сосание при кормлении является высокочастотным процессом [1, 5, 8, 13]. Так, при средней длительности сосательного периода (период времени, в течение которого малыш не отстранялся от груди) в семь минут количество сосательных движений составило 364, а средний интервал в сосательном эпизоде – 0,7 секунды [13]. Эти данные подтверждаются другими

исследованиями, где средняя частота составила 0,9–1,0 сосательных движений в минуту [1, 5, 6, 8].

Исследования доказали, что при естественном вскармливании ребенок в первые две минуты съедает 50% всего необходимого ему молока, в первые четыре минуты – 90%, а пищевая фаза кормления составляет лишь десять минут, остальное время ребенок просто удовлетворяет сосательный рефлекс [4]. При искусственном вскармливании такие параметры недостижимы, но стремиться к ним нужно.

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

### Модель искусственного вскармливания

Кормление из бутылочки – довольно сложный нестационарный процесс. При его моделировании рассматривается область, в которую включена ротовая полость ребенка, отверстие в соске и соска. Непосредственно бутылочка не рассматривается (т.к. размеры бутылочки на несколько порядков больше размеров отверстия, и течение будет определяться только близко лежащей зоной – соской). Рассматривается стандартная соска с одним круглым отверстием. Основными параметрами этой области являются размер отверстия в соске (его величина в среднем  $d = 0,4$  мм), толщина соски  $h = 2$  мм, длина всей области, которая включает в себя длину самой соски и ротовую полость ребенка  $L = 40$  мм.

Экспериментально известно изменение давления во времени внутри ротовой полости у ребенка при естественном вскармливании [8]. Этот результат используется в модели в качестве исходных данных, т.к. предполагается, что нагрузка при искусственном вскармливании должна быть такая же, как при кормлении грудью, или же максимально близкая к ней. Давление в бутылочке можно считать равным атмосферному, т.к. ребенок при глотании расслабляет губы и разжимает десна, воздух периодически поступает в бутылочку.

Рассматривается течение жидкости за определенный промежуток времени  $t \in (0, T)$  в области с определенными параметрами ( $d$ ,  $h$ ,  $L$ ), на границах этой области задано изменение давления. Варьируя, главным образом, значение диаметра отверстия, получим расход молока в зависимости от времени, интегральная величина которого должна минимально отличаться от соответствующего значения, экспериментально определенного для естественного вскармливания [4, 8].

Для моделирования искусственного вскармливания следует решить задачу гидродинамики для нестационарного течения вязкой несжимаемой жидкости через короткий капилляр, т.к. толщина стенки соски и диаметр отверстия – величины одного порядка. Течение такого вида неламинарное и имеет области около сужения, где образуется вихрь [2, 3].

Процесс искусственного вскармливания характеризуется следующими параметрами:

- давлением внутри ротовой полости ребенка,
- расходом молока, поступившего ребенку,
- промежутком времени, за который ребенок наедается,
- диаметром отверстия соски,
- толщиной соски.

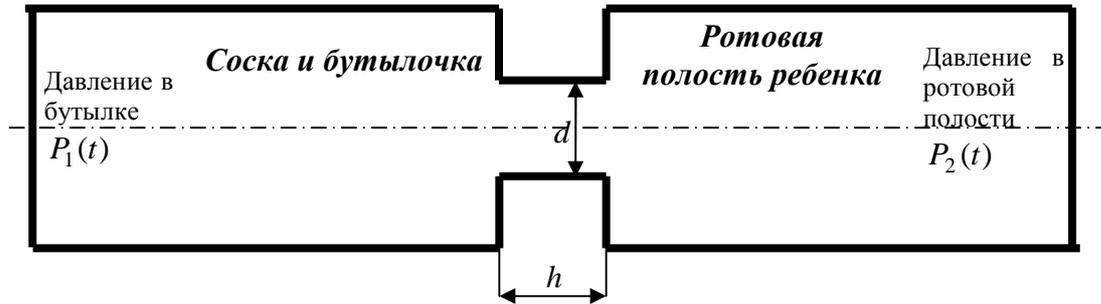


Рис. Рассматриваемая область для модели искусственного вскармливания

В модели искусственного вскармливания рассматривается осесимметричное течение ньютоновской вязкой жидкости в цилиндрической области с локальным сужением (см. рис.) с заданным давлением на границах. При варьировании параметров сужения: толщины стенки соски  $h$  и диаметра отверстия в соске  $d$ , получаются различные расходные характеристики, которые сравниваются с известными экспериментальными данными (расход молока, необходимый ребенку, и изменение этого параметра во времени) [4, 8]. В модели пренебрегается упругостью соски, т.к. влияние этого параметра на течение незначительно.

Задачи такого рода решались ранее для течения крови в сосудах, однако граничные условия были другие [2, 3]. На границе была известна скорость [2], либо граница находилась на бесконечности [3], где течение считалось ламинарным. В данной работе необходимо определить объемный расход молока  $Q(t)$  при заданном во времени перепаде давления. При этом варьируются диаметр и длина отверстия так, чтобы приблизить расходную характеристику течения к известной для естественного вскармливания  $Q^*(t)$ , то есть

$$\int_0^T [Q(t) - Q^*(t)]^2 dt \rightarrow \min.$$

### Основные уравнения

Рассматривается круглая цилиндрическая трубка с симметричным прямоугольным сужением. Жидкость считается несжимаемой, ньютоновской, вязкой [11]. Течение описывается уравнением Навье-Стокса в цилиндрических координатах  $(r, \theta, z)$ . Рассматривается осесимметричный поток в области  $0 \leq r \leq R$ ,  $0 \leq \theta \leq 2\pi$ ,  $0 \leq z \leq L$ . Уравнения Навье-Стокса в дивергентной форме и уравнение неразрывности имеют вид:

$$\frac{\partial V_r}{\partial t} + \left( \frac{\partial(V_r V_r)}{\partial r} + \frac{\partial(V_z V_r)}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left( \frac{\partial^2 V_r}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 V_r}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{V_r}{r} \right) \right), \quad (1)$$

$$\frac{\partial V_z}{\partial t} + \left( \frac{\partial(V_r V_z)}{\partial r} + \frac{\partial(V_z V_z)}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left( \frac{\partial^2 V_z}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_z}{\partial r} \right), \quad (2)$$

$$\frac{\partial(rV_r)}{\partial r} + \frac{\partial(rV_z)}{\partial z} = 0, \quad (3)$$

где  $V_r$  – радиальная скорость,  $V_z$  – осевая скорость,  $p$  – давление,  $\rho$  – плотность жидкости,  $\nu$  – вязкость жидкости.

Граничные условия на внутренней стенке трубы при  $r = R$ , в том числе в месте сужения, – условие прилипания и непроницаемости, соответственно:

$$V_z|_{r=R} = 0, \quad (4)$$

$$V_r|_{r=R} = 0, \quad (5)$$

на оси симметрии:

$$V_r|_{r=0} = 0, \quad (6)$$

$$\frac{\partial V_z}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0, \quad (7)$$

$$\frac{\partial p}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0, \quad (8)$$

на входе при  $z = 0$  и выходе при  $z = L$  заданы разница давлений и отсутствие радиальной компоненты скорости:

$$V_r|_{z=0} = 0, \quad (9)$$

$$\frac{\partial V_z}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0, \quad (10)$$

$$p|_{z=0} = P_1(t), \quad (11)$$

$$V_r|_{z=L} = 0, \quad (12)$$

$$\frac{\partial V_z}{\partial z} \Big|_{z=L} = 0, \quad (13)$$

$$p|_{z=L} = P_2(t). \quad (14)$$

В начальный момент времени скорость и давление равны нулю:

$$V_z|_{t=0} = 0, \quad (15)$$

$$V_r|_{t=0} = 0, \quad (16)$$

$$p|_{t=0} = 0. \quad (17)$$

Решение задачи позволит определить распределение скоростей и давления в рассматриваемой области во времени, а значит и расход жидкости  $Q(t)$ , который

должен быть максимально близок к соответствующей расходной характеристике, определенной экспериментально при естественном вскармливании [4, 8]; изменяя параметры отверстия в соске  $d$  и  $h$ , можно этого добиться.

### Выводы

Модель позволяет определить основные параметры соски, так чтобы разница между естественным и искусственным вскармливанием по основным их показателям (давление и расход) была минимальна. Экспериментальные данные давления и расхода известны лишь для здоровых детей старше шести месяцев. Однако, косвенно, по ряду факторов (вес, рост, доношенность, здоровый или ослабленный) при оценке общего состояния здоровья ребенка, можно менять амплитудные и интегральные значения известных характеристик. Например, для новорожденных такую оценку можно провести, используя шкалу Апгар.

Такой подход позволит более индивидуально производить подбор соски, опираясь на рекомендации врача.

### Список литературы

1. Colley, J.R.T. Sucking and swallowing in infants / J.R.T. Colley, B. Creamer // British Medical Journal. – 1958. – Aug. 16. – P. 422–423.
2. Lee, J.S. Flow in locally constricted tubes at low Reynolds numbers / J.S. Lee, Y.C. Fung // Journal of Applied Mechanics. – 1970. – March. – P. 9–16.
3. Liou, R.J. 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, No. 5. – P. 325–337.
4. Lucas, A. Pattern of milk flow in breast-fed infants / A Lucas, P.J. Lucas, J.D. Baum // The Lancet Ltd. – 1979. – P. 57–58.
5. Prieto, C.R. 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.
6. Voloschin, L.M. A new tool for measuring the suckling stimulus during breastfeeding in humans: the orokinogram and the Fourier series / L.M. Voloschin, O. Althabe, H. Olive, V. Diena, B. Repezza // Journal of Reproduction and Fertility Ltd. – 1998. – P. 219–224.
7. Аверьянова, Н.И. Как воспитать здорового ребёнка / Н.И. Аверьянова, А.А. Гаслова. – Пермь, 2001.
8. Алексеев, Н.П. Роль вакуумных и тактильных стимулов в процессе выведения молока из молочной железы женщины / Н.П. Алексеев, В.К. Ярославский, С.Н. Гайдуков, В.И. Ильин, Ю.А. Спесивцев, Т.К. Тихонова, Н.Б. Кулагина // Физиологический журнал им. И.М. Сеченова. – 1994. – № 9. – С. 67–74.
9. Ахмедов, А.А. Частота зубочелюстных аномалий у детей, находившихся на искусственном вскармливании / А.А. Ахмедов, Е.Г. Гусейнов, С.Б. Аскеров // Стоматология. – 1986. – № 1. – С. 79–81.
10. Булгакова, М.И. 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.
11. Грачев, И.И. Физиология лактации, общая и сравнительная. / И.И. Грачев, В.П. Галанцев. – Л.: Наука, 1973. – 590 с. – (Серия «Руководство по физиологии»).
12. Дятлов, С.А. О силе сосания новорожденного и об аппарате для определения этой силы / С.А. Дятлов // Педиатрия. – 1953. – № 2. – С. 33–36.
13. Кузьменко, Л.П. Сосательный рефлекс у новорождённых / Л.П. Кузьменко // Педиатрия. – 1957. – № 11. – С. 22–27.
14. Финадеева, Е.В. 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.

15. Шмурак, М.И. 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.

## **BIOMECHANICAL MODELLING OF BOTTLE-FEEDING IN INFANTS**

**V.M. Tverier, M.I. Shmurak, E.Y. Simanovskaya, Y.I. Nyashin (Perm, Russia)**

Feeding in infants determines forming and development of the all dentofacial system and its main functions (sucking, breathing, swallowing, mastication) with respect to the loading of the masticatory apparatus. It is established experimentally that artificial feeding is greatly different from breast-feeding and it does not provide necessary functional load on the maxillofacial region. Modelling of bottle-feeding process in infant is performed, in order to make the artificial feeding conditions similar to the breast-feeding ones. In the article, the statement of the artificial feeding problem is presented, in order to make the biomechanical conditions of bottle-feeding similar to the breast-feeding conditions by modelling of this process.

**Key words:** breast-feeding and bottle-feeding, nipple, model, pressure, flow.

*Получено 10 сентября 2007*