

УДК 531/534: [57+61]

## **МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИСКУССТВЕННОГО ВСКАРМЛИВАНИЯ ДЕТЕЙ НА ОСНОВЕ БИОМЕХАНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

**В.М. Тверье, М.И. Шмурак, Ю.И. Няшин**

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

**Аннотация.** Искусственное вскармливание не обеспечивает ребенку функциональной нагрузки, необходимой для правильного формирования челюстно-лицевой области. В работе представлены результаты биомеханического моделирования искусственного вскармливания с целью приблизить механические условия последнего к условиям функционирования зубочелюстной системы при естественном вскармливании. На основе модели разработана методика назначения режимов искусственного вскармливания.

**Ключевые слова:** искусственное вскармливание, биомеханическое моделирование, соска, давление, объем молока при кормлении.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Распространенность искусственного вскармливания в современном мире и установленные факты его отрицательного влияния на формирование зубочелюстной системы создают предпосылки для изучения и усовершенствования этого процесса [6]. В настоящее время этому вопросу уделяется большое внимание. Однако все исследования в этом направлении (выбор оптимальной конструкции соски), как правило, носят экспериментальный характер. Возникает необходимость в теоретическом обосновании подбора соски для искусственного вскармливания, опираясь на результаты биомеханического моделирования этого процесса.

### **ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ**

При моделировании искусственного вскармливания [4] рассматривается область, в которую включены ротовая полость ребенка, отверстие в соске и соска с одним круглым отверстием. Непосредственно бутылочка не рассматривается (так как размеры бутылочки на несколько порядков больше размеров отверстия, и течение будет определяться только близлежащей зоной – соской). Основными параметрами этой области являются размер отверстия в соске  $d$ , толщина соски  $h$ , длина всей области, которая включает в себя длину самой соски и ротовую полость ребенка  $L$  (рис. 1).

Предполагается, что нагрузка при искусственном вскармливании должна быть такая же, как при кормлении грудью, или же максимально близкая к ней, поэтому на

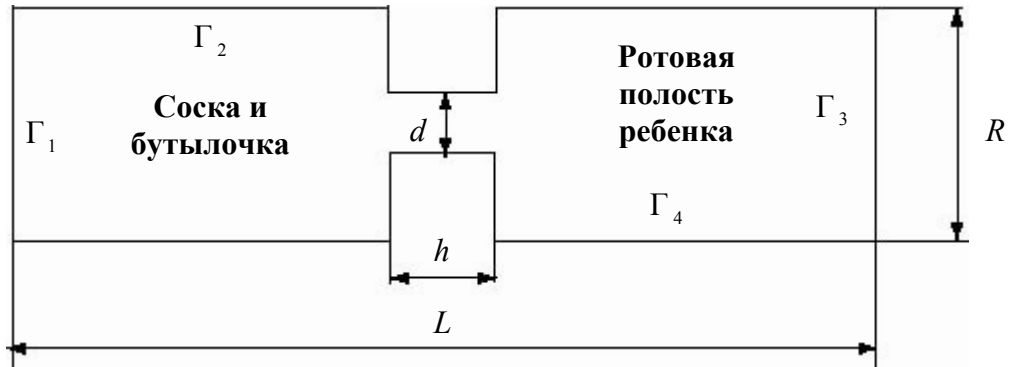


Рис. 1. Рассматриваемая область для модели искусственного вскармливания

границе задается экспериментально известное изменение давления внутри ротовой полости у ребенка при естественном вскармливании [9] (рис. 2). Давление в бутылочке можно считать равным атмосферному, так как воздух периодически поступает в бутылочку.

Рассматривается течение жидкости ( $\nu$  – вязкость 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 объём молока  $\tilde{V}(t)$  в зависимости от времени, интегральная величина которого должна минимально отличаться от соответствующего значения, экспериментально известного [8] для естественного вскармливания  $\tilde{V}^*(t)$  (рис. 3).

$$\int_0^T [\tilde{V}(t) - \tilde{V}^*(t)]^2 dt \rightarrow \min_{h,d,\nu}. \quad (1)$$

Нужно решить задачу гидродинамики для нестационарного течения вязкой несжимаемой жидкости через короткий капилляр, так как толщина стенки соски и диаметр отверстия – величины одного порядка. Течение такого вида имеет области около сужения, где образуется вихрь, и значительно отличается от течения Пуазейля [6, 7]. В модели пренебрегается упругостью соски. Рассмотрено осесимметричное течение ньютоновской жидкости в цилиндрической области с локальным сужением (см. рис. 1) с заданным давлением на границах.

Постановка задачи имеет вид

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

$$\nabla \cdot V = 0, \quad (3)$$

$$V|_{\Gamma_2, \Gamma_4} = 0, \quad (4)$$

$$p|_{\Gamma_1} = P_{\text{атм}}, \quad (5)$$

$$p|_{\Gamma_3} = P(t), \quad (6)$$

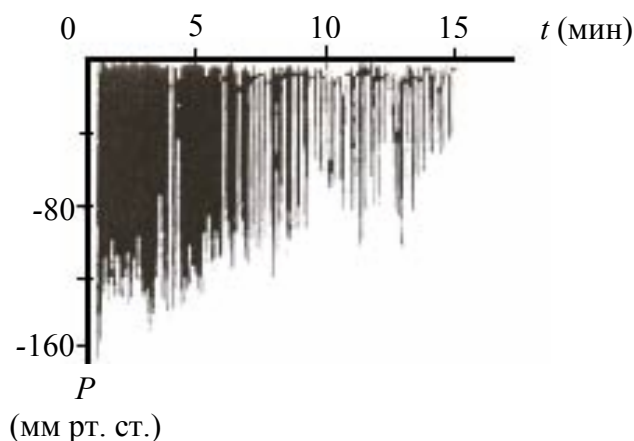


Рис. 2. График зависимости давления внутри ротовой полости у ребенка при естественном вскармливании [9]

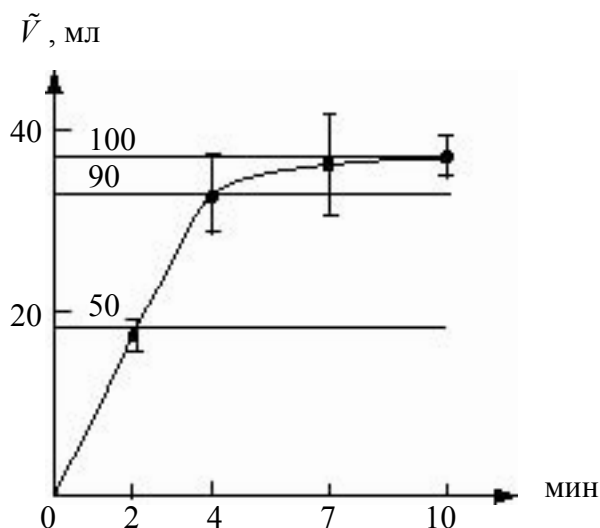


Рис. 3. Объем молока, высосанного младенцем при естественном вскармливании из груди, в зависимости от времени [8]

$$V|_{t=0} = 0, \quad (7)$$

$$p|_{t=0} = P_{\text{атм}}, \quad (8)$$

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

Задача решалась численно в пакете *COSMOSFloWorks SolidWorks* (лиц. *SENO211–20/07–2004*). Для оценки точности решения были решены тестовые задачи. Одна из них – о развитии ламинарного течения в трубе, а другая – о течении жидкости через локальное сужение в цилиндрической трубе. Результаты, полученные в ходе решения тестовых задач, позволили сделать вывод о возможности получения достаточно точного решения поставленной задачи в программном пакете *COSMOSFloWorks SolidWorks*.

Кроме того, был проведен анализ влияния изменения параметров расчетной области и вязкости жидкости на основные параметры течения – скорость и давление. В работе [5] было установлено, что пределы изменения вязкости смеси детского питания,

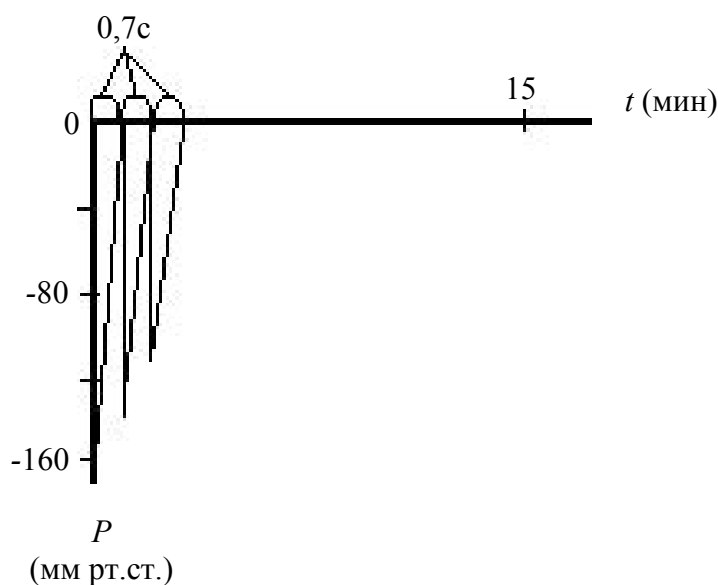


Рис. 4. Аппроксимация функции изменения давления в ротовой полости ребенка

грудного и коровьего молока не превышают 7%. Установлено, что такой диапазон изменения вязкости почти не влияет на основные параметры течения. Изменение параметров расчетной области позволило определить их оптимальные значения:  $D_1 = D_2 = 0,009$  м,  $L_1 = 0,035$  м,  $L_2 = 0,015$  м, чтобы уменьшить время расчета, не теряя точности расчета. Также был проведен анализ влияния величины шага по времени на решение задачи.

Таким образом, функция объема в общем случае является функцией трех переменных  $\tilde{V}(t, d, h)$ , формула (1). Для построения такой функции необходимо построить симметричный композиционный ротатбельный униформплан второго порядка, т.е. решить ряд задач для определения объема молока при разных параметрах отверстия.

### СПОСОБЫ ЗАДАНИЯ ДАВЛЕНИЯ НА ГРАНИЦЕ

Для определения объема молока, полученного ребенком при кормлении через соску с определенными параметрами (диаметр отверстия и толщина стенки соски), решалась нестационарная задача о течении вязкой жидкости в трубе с локальным сужением. На границах области задавалось изменение давления (см. рис. 2). Вид этой функции можно несколько упростить для решения задачи.

Экспериментально известное давление (см. рис. 2) представляется в виде циклов, не зависящих друг от друга. Таким образом, весь период сосания разбивается на отдельные промежутки – так называемые сосательные эпизоды. Вид функции изменения давления можно аппроксимировать, как показано на рис. 4, т.е. можно разбить на участки по 0,7 с (средняя длительность сосательного эпизода [9]), где давление изменяется по линейному закону. Предполагается, что каждый «пик» изменения давления не зависит от предыдущего, что подтвердилось результатами решения задач.

Таким образом, каждый сосательный эпизод независим, и для получения результатов для всего промежутка времени достаточно рассмотреть лишь несколько характерных сосательных эпизодов, а не рассчитывать всю функцию.

Весь график изменения давления разбивается на участки с примерно одинаковой величиной пиков. В нашем случае (рис. 5) промежуток времени, равный 14,35 мин,

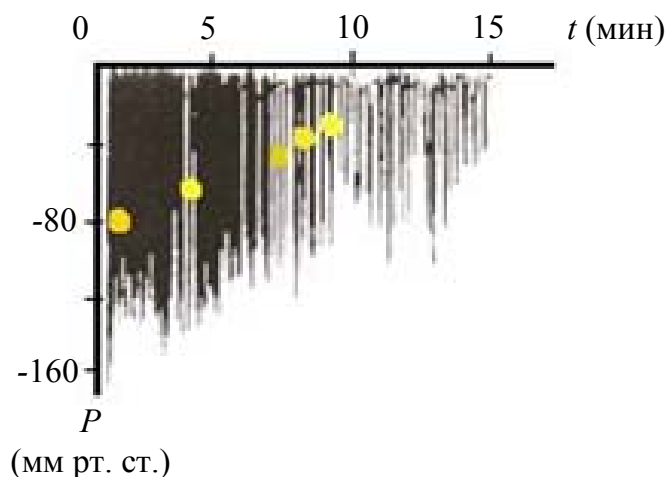


Рис. 5. Аппроксимация изменения давления в ротовой полости ребенка [4] квадратичной функцией по характерным точкам

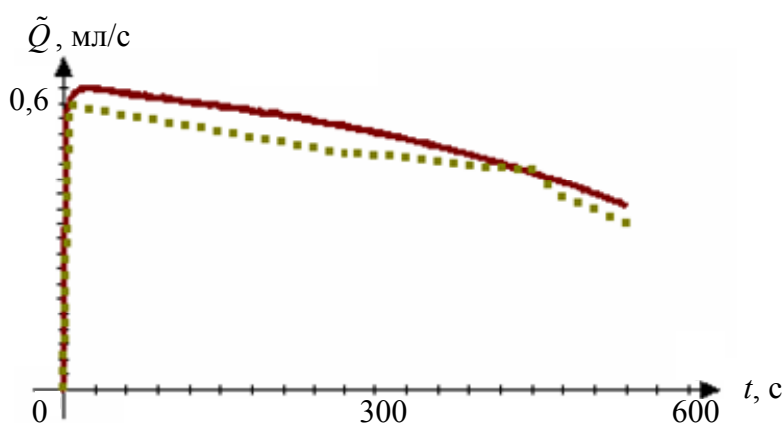


Рис. 6. Объемный расход молока, полученный при решении задачи осреднением давления (сплошная линия) и разбиением на сосательные эпизоды

можно разбить на пять неодинаковых отрезков, где пик давления на первом из них равен  $-160$  мм рт. ст, тогда функция давления  $p = 123 - 30t$  кПа, промежуток времени равен  $0,1$  мин; на втором промежутке времени до  $4,5$  мин пик давления равен  $-120$  мм рт. ст,  $p = 117 - 23t$  кПа; на третьем промежутке времени до  $7,5$  минут пик давления равен  $-100$  мм рт. ст,  $p = 115 - 19t$  кПа; на четвертом промежутке времени до  $12$  мин пик давления равен  $-80$  мм рт. ст,  $p = 112 - 15t$  кПа; на пятом промежутке времени до  $14,35$  мин пик давления равен  $-40$  мм рт. ст,  $p = 107 - 8t$  кПа. Для промежутка времени  $14,35$  мин решено пять задач с разными граничными условиями (давление), в результате в каждой задаче получен объем молока  $q$ , полученный ребенком за один сосательный эпизод  $0,7$  с.

Согласно исследованиям [9], сосательная активность в первой половине кормления выше, чем во второй. Так, в первой половине кормления, длившейся  $4,8$  мин, ребенок сделал  $275$  сосательных движений, а во второй половине – лишь  $218$ . Значит длительность одного цикла в первой половине кормления равна  $1,05$  с, а во второй половине –  $1,32$  с. Тогда время паузы (отдыха) в первой половине составит  $0,35$  с, а во второй половине –  $0,62$  с. Получается, что ребенок во второй половине кормления тратит времени на отдых почти столько же, сколько на непосредственное

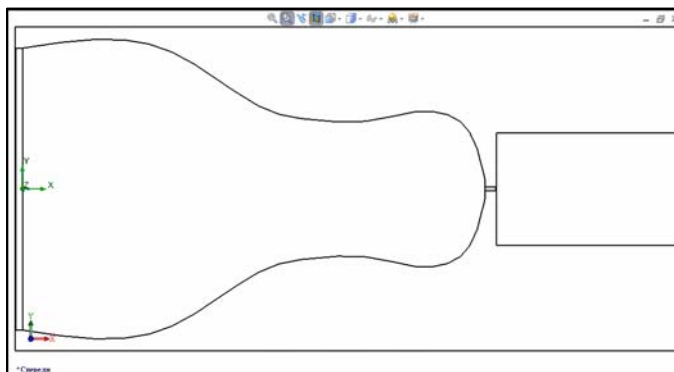


Рис. 7. Расчетная область в виде соски с прямоугольным сужением

сосание. Таким образом, соотношение полного времени сосания к рабочему времени сосания для первой половины кормления составит 1,5, а для второй половины 1,89.

Полагается, что данные соотношения действительны для любого кормления. Тогда количество сосательных эпизодов на промежутке времени  $\Delta t$  можно определить по формуле

$$n = \frac{\Delta t}{1,5 \cdot 0,7} \text{ – для первой половины кормления,}$$

$$n = \frac{\Delta t}{1,89 \cdot 0,7} \text{ – для второй половины кормления,}$$

Значит, для промежутка времени 14,35 мин можно считать:

1.  $\Delta t = [0; 0,1]$  мин при  $p = 123 - 30t$  кПа,  $n = 6$ ;
2.  $\Delta t = (0,1; 4,5]$  мин при  $p = 117 - 23t$  кПа,  $n = 251$ ;
3.  $\Delta t = (4,5; 7,5]$  мин при  $p = 115 - 19t$  кПа,  $n = 171$ ;
4.  $\Delta t = (7,5; 12]$  мин при  $p = 112 - 15t$  кПа,  $n = 204$ ;
5.  $\Delta t = (12; 14,35]$  мин при  $p = 107 - 8t$  Па,  $n = 107$ .

Тогда объем молока, полученный ребенком за промежуток времени  $\Delta t$

$$\tilde{V} = n \cdot q. \quad (9)$$

Другой вариант решения задачи течения вязкой жидкости через сужение с заданным изменением давления на границе – это осреднение самой функции  $P(t)$ . Изменение давления аппроксимировано квадратичной функцией по тем же точкам, которые рассматривались в решении с разбиением на сосательные эпизоды (рис. 5).

Рассматривается промежуток времени  $\Delta t = 540$  с, жидкость – грудное молоко. Результаты, полученные при решении этой задачи, хорошо совпадают с результатами, полученными в ходе решения задачи разбиением на сосательные эпизоды. Так, при сравнении зависимости расхода молока от времени максимальное отклонение не превышает 9% (рис. 6).

Однако, чтобы найти объем молока, который ребенок получает за этот промежуток времени, нужно проинтегрировать функцию расхода (результат 275 мл), а при решении разбиением на циклы и определении объема по формуле (9) объем составил 144 мл. Такое отличие легко объясняется тем, что в случае если просто проинтегрировать расход по времени, то получается объем молока при сосании ребенком без пауз. На самом деле при кормлении ребенок отдыхает во время пауз при сосании, и время отдыха составляет 30–50% от общего времени. Поэтому наиболее верным будет искать решение первым способом (разбивая на сосательные эпизоды). Кроме того, сокращается время расчета задачи.

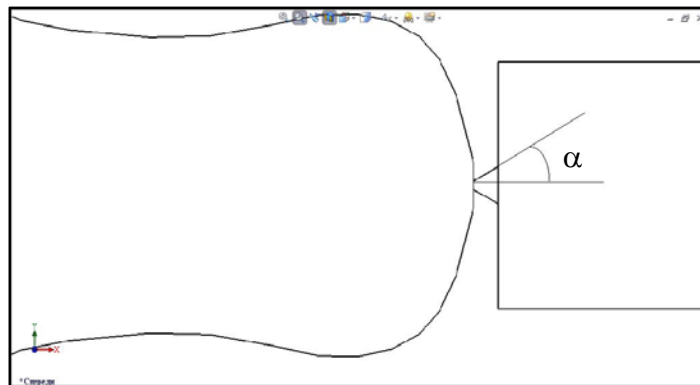


Рис. 8. Расчетная область в виде соски, с конусным сужением,  $\alpha$  – угол конуса (наклона к горизонту)

### ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ФОРМЫ ОБЛАСТИ И ФОРМЫ СУЖЕНИЯ НА РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

При моделировании искусственного вскармливания рассматриваемая область представляет собой цилиндр с локальным сужением (см. рис. 1). Такой вид области выбран с целью упрощения разбиения области сеткой и уменьшения времени расчета. Предполагается, что на течение жидкости влияют только параметры самого сужения, а форма и величина области – не влияют. Рассмотрено влияние изменения формы области на основные параметры течения. Рассмотрим задачу, где соска рассматривается в натуральную величину, т.е. область до сужения построена по точкам, снятым с реальной соски, а область после сужения останется цилиндрической (рис. 7). Оценивались результаты для одного сосательного эпизода 0,7 с, параметры сужения:  $d = 0,0003$  м,  $h = 0,0009$  м, жидкость – грудное молоко. Объем молока за 0,7 с, полученный в задаче с цилиндрической областью, составил 0,0588 мл, а в задаче с областью в форме соски – 0,0604 мл, т.е. на 3% больше.

Некоторые современные соски имеют отверстие в виде конуса, чтобы жидкость не проливалась. Для оценки влияния этой особенности на объем молока, получаемого ребенком при кормлении, были решены две задачи. Моделируемая область – соска с сужением в виде усеченного конуса (рис. 8), угол наклона к горизонту  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ . Параметры сужения:  $d = 0,0003$  м – малый диаметр (внутренний),  $h = 0,0009$  м. Объем молока, за один сосательный эпизод для конусного отверстия с углом  $45^\circ$  составил 0,0684 мл, а для конусного отверстия с углом  $30^\circ$  – 0,0707 мл. Таким образом, объем молока, полученного ребенком через соску с прямым отверстием, меньше на 12%, чем через соску с конусным отверстием. При угле с горизонтом  $45^\circ$  меньше на 15%, чем через соску с конусным отверстием при угле с горизонтом  $30^\circ$ .

В соответствии с полученными данными можно сделать вывод, что цилиндрическая форма моделируемой области по расходной характеристике соответствует области в виде соски, но имеет явные преимущества – это более простая сетка разбиения области, а это уменьшает время расчета. Анализ влияния изменения формы сужения на объем молока, которое через него протекает, показал увеличение этого параметра до 15%. Поэтому, можно сделать вывод, что все расчеты, сделанные для цилиндрической области с сужением, достаточно точно описывают течение молока (смеси) через соску с круглым отверстием любого типа (конусное или прямое).

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИИ ОБЪЕМА ЖИДКОСТИ, ПОЛУЧЕННОГО ПРИ ИСКУССТВЕННОМ ВСКАРМЛИВАНИИ

Аналитическая зависимость функции объема жидкости, полученного при искусственном вскармливании  $\tilde{V}(t, d, h)$ , получена методом планирования эксперимента аппроксимацией с помощью гиперболического тангенса. Функция объема

$$\tilde{V}(d, h, t) = 500 th(f(d, h, t)), \quad (10)$$

где  $f(d, h, t)$  – полином второго порядка.

На рис. 9 представлены зависимости объема молока от одного из параметров при двух остальных фиксированных. В центре плана построения аппроксимации (реальный диапазон изменения параметра) аналитическая функция совпадает со значениями, полученными в расчетах по модели.

Изменение построенной функции объема молока, полученного ребенком, соответствует реальности. Очевидно, что с увеличением диаметра отверстия или времени кормления будет увеличиваться и объем молока (рис. 9, а, в), от толщины стенки соски зависимость объема молока довольно слабая (рис. 9, б).

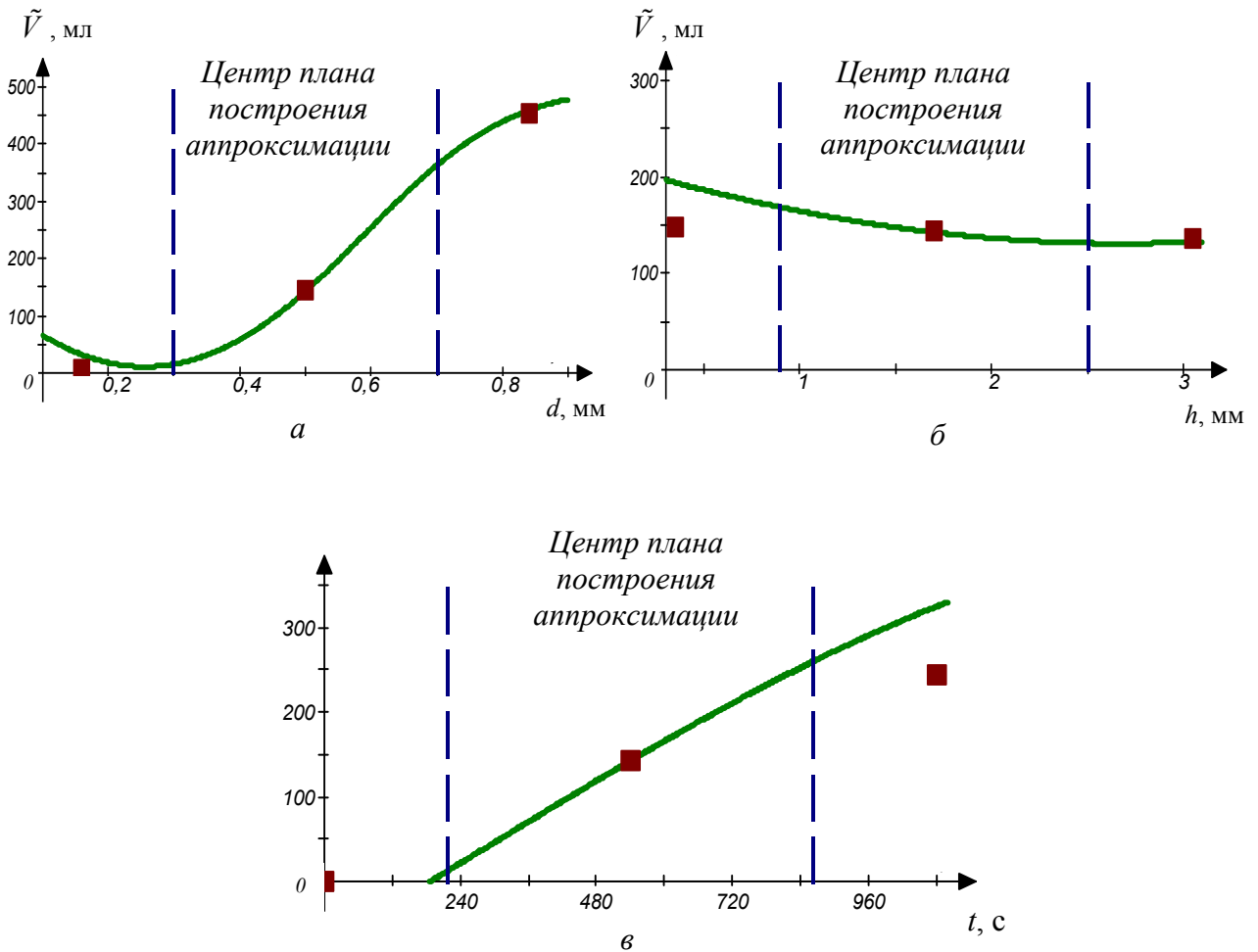


Рис. 9. Зависимости объема молока (смеси): а – от диаметра отверстия  $d$  при  $h = 1,7$  мм,  $t = 540$  с; б – от толщины стенки соски  $h$  при  $d = 0,5$  мм,  $t = 540$  с; в – от времени  $t$  при  $d = 0,5$  мм,  $h = 1,7$  мм; точки на графике – значения, полученные в расчетах по модели



### ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ ИСКУССТВЕННОГО ВСКАРМЛИВАНИЯ ДЛЯ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ПОДБОРА СОСКИ

Искусственное вскармливание – сложный нестационарный процесс, который, с одной стороны, обеспечивает ребенка необходимыми продуктами питания, с другой стороны, закладывает основы для развития челюстно-лицевой области. Исследования [2, 3] показали, что, как правило, нагрузка на жевательный аппарат при искусственном вскармливании недостаточна и ведет к различного рода отклонениям в его формировании. Основной причиной этого является неправильный выбор соски для кормления. Современные соски производятся разными по форме, с отверстиями различного диаметра, величина которых, как правило, определяется экспериментально.

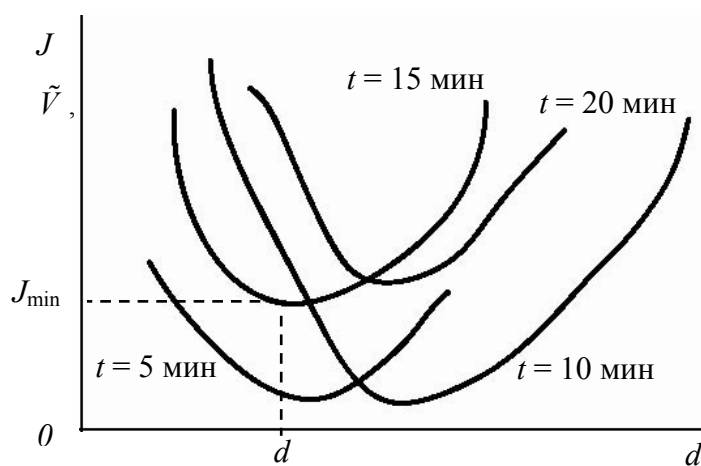


Рис. 10. Определение оптимального диаметра  $d$  для разных промежутков кормления

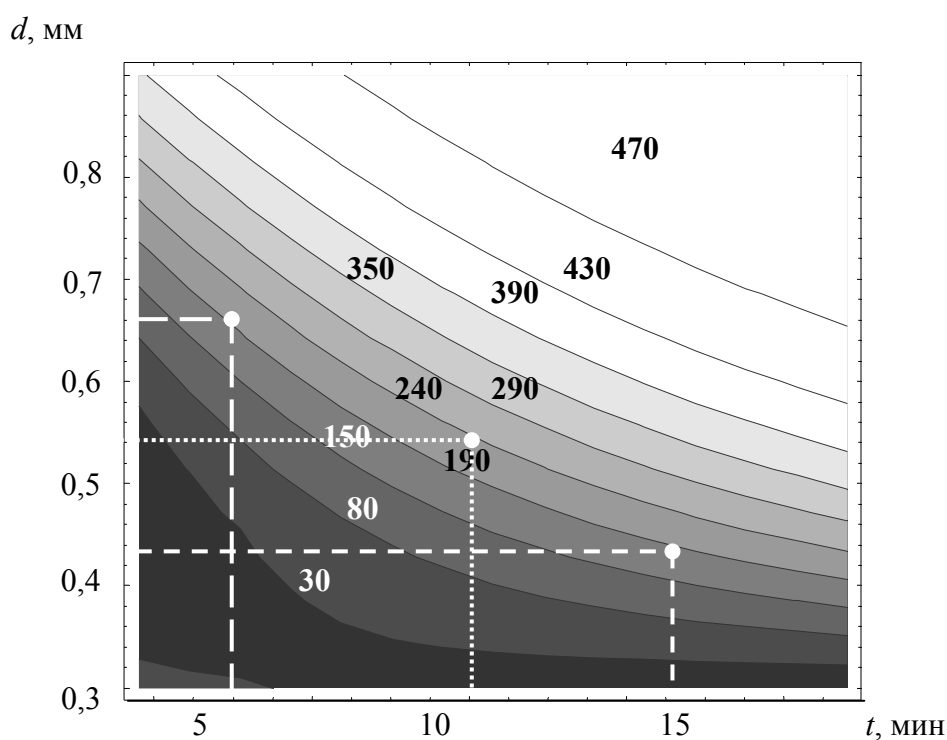


Рис. 11. График функции объема (мл) в плоскости переменных  $d$  и  $t$

Модель искусственного вскармливания позволяет теоретически, с точки зрения гидродинамики, обосновать выбор той или иной соски для каждого типа жидкости (грудное молоко или сок), учитывая необходимость создавать такое же разрежение в полости рта, как и при естественном вскармливании, и получать определенный объем жидкости.

Для индивидуального подбора соски необходимы дополнительные измерения разрежения в полости рта ребенка во время сосания. Тогда, используя модель искусственного вскармливания, можно определить аналитическую зависимость объема жидкости  $\tilde{V}(d, h, t)$ . Для определения диаметра отверстия соски найдем минимум функционала (1) для разных промежутков кормления (рис. 10).

В соответствии с полученными данными о диаметре и времени кормления из графика функции объема в плоскости переменных  $d$  и  $t$  при фиксированном  $h$  можно определить интересующий объем молока (рис. 11).

При решении задачи использовались данные изменения давления в ротовой полости у здорового ребенка в возрасте 1,5 месяцев. В этом случае время кормления составило 14,35 минут, при определении минимума функционала (1) диаметр равен 0,44 мм (толщина стенки соски 1,5 мм). Кроме того, рассчитаны минимумы функции  $J$  для промежутков времени кормления:  $t = 5$  и 10 мин и определены диаметры отверстия в соске:  $d = 0,66$  и 0,54 мм, соответственно.

На рис. 11 определяем интересующий объем молока – 150 мл, что соответствует экспериментальным данным для этого случая [9] и нормам педиатрии для этого возраста [1].

Для методики определения индивидуальных параметров искусственного вскармливания необходимы следующие данные:

- комплексный диагноз состояния ребенка;
- определение изменения давления в зависимости от времени в ротовой полости ребенка и количества полученной пищи;
- время кормления, назначенное врачом в соответствии с диагнозом и возрастом ребенка, с учетом индивидуальных особенностей.

Методика:

1. По данным давления в ротовой полости у ребенка определяется функция объема  $\tilde{V}(t, d, h)$ .
2. Находится минимум функционала (1) (рис. 10), т.е. определяется диаметр отверстия в зависимости от времени кормления.
3. На графике функции объема в плоскости переменных  $d, t$  определяется объем молока (рис. 11).
4. Если полученный объем сильно отличается от рекомендуемого педиатром объема (норма объема молока за одно кормление в соответствии с возрастом), то в этом случае конструкция соски не удовлетворяет требованиям и должна быть изменена.

В модели искусственного вскармливания использовались данные для здоровых детей в возрасте 1,5 месяцев. Согласно исследованиям [3] интенсивность сосания у здоровых детей в возрасте 1,5 – 5 месяцев изменяется незначительно. Следовательно, приведенные результаты могут быть использованы для определения параметров искусственного вскармливания для здоровых детей в возрасте 1,5 – 5 месяцев.

## Выводы

Построена модель искусственного вскармливания: разработаны алгоритмы решения задачи моделирования течения питательных смесей с целью приближения биомеханических условий искусственного вскармливания к условиям естественного;

установлены основные закономерности течения молока; выделены основные параметры, определяющие процесс искусственного вскармливания.

На основе моделирования искусственного вскармливания разработана методика определения параметров искусственного вскармливания (диаметр отверстия и толщина стенки соски). При выбранных параметрах во время искусственного вскармливания ребенок прикладывает такие же усилия, как при естественном, получая такой же объем молока. Методика может применяться для индивидуального подбора параметров искусственного вскармливания, в том числе для ослабленных детей.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аверьянова, Н.И.* Как воспитать здорового ребёнка / Н.И. Аверьянова, А.А. Гаслова. – Пермь, 2001.
2. *Булгакова, М.И.* Биомеханика вскармливания детей раннего возраста / М.И. Булгакова, Е.Ю. Симановская, Ю.И. Няшин, В.М. Тверье // Российский журнал биомеханики. – 2003. – № 4. – С. 9–21.
3. *Новожилова, Т.П.* Состояние зубочелюстной системы у детей, родившихся с задержкой внутриутробного развития: Автореф. дис. ... канд. мед. наук. – Пермь, 1992.
4. *Тверье, В.М.* Биомеханическое моделирование искусственного вскармливания детей раннего возраста / В.М. Тверье, М.И. Шмурак, Е.Ю. Симановская, Ю.И. Няшин // Российский журнал биомеханики. – 2007. – Т. 11, № 3. – С. 54–61.
5. *Тверье, В.М.* 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
6. *Lee, J.S.* Flow in locally constricted tubes at low Reynolds numbers / J.S. Lee, Y.C. Fung // Journal of Applied Mechanics. – March 1970. – P. 9–16.
7. *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.
8. *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.
9. *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.

## METHOD OF DETERMINATION OF THE BOTTLE-FEEDING PARAMETERS IN INFANTS ON THE BASIS OF BIOMECHANICAL MODELLING

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

The artificial feeding does not provide necessary functional loading which is necessary for normal forming of the maxillofacial region of a child. In the article, the results of biomechanical bottle-feeding modelling are represented for the purpose to approach mechanical conditions of the last to conditions of the dentofacial system functioning during the breast-feeding. Method of prescription of the bottle-feeding conditions is developed on the basis of model.

**Key words:** bottle-feeding, biomechanical modelling, nipple, pressure, milk volume at feeding.

Получено 20 ноября 2009