

DOI: 10.15593/RZhBiomech/2019.1.03  
УДК 618.63



**Российский  
Журнал  
Биомеханики**  
www.biomech.ru

## **ОПТИМИЗАЦИЯ АМПЛИТУДЫ СТИМУЛОВ ВАКУУМА В АППАРАТЕ ДЛЯ ВЫВЕДЕНИЯ МОЛОКА ИЗ МОЛОЧНОЙ ЖЕЛЕЗЫ ЛАКТИРУЮЩИХ ЖЕНЩИН**

**В.И. Ильин<sup>1</sup>, Н.П. Алексеев<sup>1</sup>, М.М. Трошкин<sup>2</sup>, В.А. Улезько<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Кафедра общей физиологии Санкт-Петербургского государственного университета, Россия, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9, e-mail: ultra3@yandex.ru

<sup>2</sup> Закрытое акционерное общество Производственная компания «Медицинская техника», Россия, 300041, Тула, ул. Курковая, 11

**Аннотация.** Грудное молоко является уникальным питанием для здоровья и развития новорожденных. Вместе с тем при грудном вскармливании в ряде случаев женщина по разным причинам в течение некоторого времени не может кормить ребенка, и, чтобы не прекратилась лактация, молоко должно сцеживаться. В настоящее время для сцеживания молока широкое распространение получили молоковыводящие аппараты различных конструкций. Однако параметры вакуумных стимулов, с помощью которых выводится молоко, остаются неоптимизированными. Был разработан метод, позволяющий сравнить количество молока, выведенного с помощью импульсов вакуума различной амплитуды. Молоко сцеживалось в течение одной сессии попеременно сериями импульсов вакуума различной амплитуды в два молокосорника у одной и той же женщины. Для того чтобы влияние рефлекторного повышения давления в протоковой системе железы на выведение молока было минимально, стимулы вакуума сгруппированы в следующие друг за другом две серии из 4 вакуумных импульсов с продолжительностью серии 4 с. Кроме того, для увеличения точности измерений, по окончании каждой серии импульсов вакуума был введен дополнительный импульс вакуума, с помощью которого создавался поток воздуха в направлении молокосорников, способствующий выведению остатков молока из подводящих путей в молокосорники. Было обнаружено, что для большинства кормящих женщин оптимальной амплитудой вакуума является значение около 190 мм рт. ст.

**Ключевые слова:** лактация, молоковыводящие аппараты, биомеханика выведения молока, оптимизация амплитуды вакуума.

### **ВВЕДЕНИЕ**

За последние десять лет в мире увеличилось количество кормящих грудью женщин, которые используют для коррекции лактации молоковыводящие аппараты различных конструкций [5, 6, 8]. Особенно это относится к женщинам, у которых дети родились до 34 недель беременности и не могут самостоятельно выводить молоко из молочной железы матери [4]. Кроме того, и у матерей, родивших детей в срок, могут возникать проблемы в процессе грудного вскармливания. Например, при болезни ребенка или матери, чтобы не прекратилась лактация, молоко должно сцеживаться. В связи с этим биомеханические параметры молоковыводящих аппаратов должны быть

оптимизированы так, чтобы обеспечить эффективное формирование рефлексов выведения молока, безболезненное и достаточно быстрое выведение молока из железы женщины. В предыдущей работе авторов [3] были проведены обследования по оптимизации длительности вакуумных стимулов в молоковыводящем аппарате. Использовалась разработанная авторами методика, позволяющая проводить сравнение параметров импульсов вакуума в течение одной сессии при сцеживании молока у лактирующей женщины в две емкости. Для того чтобы влияние разницы в рефлекторном повышении давления в протоковой системе [2, 7] на выведение молока было минимально, периодически следующие друг за другом серии импульсов вакуума различной длительности имели продолжительность несколько секунд. Вместе с тем в процессе работы было обнаружено, что точность используемого метода может быть повышена при внесении изменений в схему блока управления и в конструкцию переключателя молокоотборников экспериментального аппарата. В связи с этим целью настоящей работы явилось усовершенствование методики и проведение с её помощью обследований лактирующих женщин для оптимизации амплитуды вакуумных стимулов молоковыводящих аппаратов.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Обследование проводилось на 10 женщинах на 5–7-й день лактации, которые находились в послеродовом отделении института акушерства, гинекологии и репродуктологии им. Д.О. Отта Российской академии наук. Работа была выполнена с согласия этической комиссии института акушерства, гинекологии и репродуктологии им. Д.О. Отта Российской академии наук. Все обследованные женщины кормили грудью детей.

На рис. 1, *а* представлена схема экспериментальной установки, которая состоит из выносной накладке и блока управления. Выносная накладка включает пластиковую воронку 2, молоковыводящий патрубок 3, переключатель молокоотборников 4 и молокоотборники 5*а*, 5*б*. Выносная накладка соединяется с блоком управления тремя пневмопроводами 6, 7, 8.

Конструкция переключателя дополнительно детально представлена на рис. 1, *б*. Он состоит из корпуса 1, плунжера 2 с двумя проточками, штуцера 3 для связи с молокоотводящим патрубком (рис. 1, *а*, 3), штуцеров 4*а*, 4*б* для связи с молокоотборниками 5*а*, 5*б* (рис. 1, *а*), пневмоуправляемого толкателя 5 и пружины 9. Пневмотолкатель 5 включает в себя эластичную мембрану 7 с закрепленной на ней жесткой пластиной 8 и штуцер 6 для подведения избыточного давления воздуха. При нахождении плунжера 2 относительно корпуса 1 в крайнем левом положении (рис. 1, *б*) устанавливается связь между штуцером 3 и штуцером 4*а* через правую выточку на плунжере 2. При нахождении плунжера в крайнем правом положении устанавливается связь между штуцером 3 и штуцером 4*б* через левую выточку на плунжере 2. Здесь важно отметить, что переключатель молокоотборников после каждой сессии легко разбирается, моется и дезинфицируется.

Блок управления (рис. 1, *а*) включает генератор электрических импульсов управления 12, источники регулируемого 14, 15 и нерегулируемого вакуума 16, переключатель источников вакуума 13, генератор импульсов избыточного давления 11 и пережимные клапаны 9, 10. На схеме пневматические связи между элементами блока управления обозначены двойными линиями, а электрические – одинарными линиями.

Аппарат функционирует следующим образом. Перед проведением эксперимента генератор электрических импульсов управления (рис. 1, *а*, 12) программируется на выбранный режим работы. У источников регулируемого вакуума (рис. 1, *а*, 14, 15) устанавливаются требуемые значения амплитуды вакуума. Пластиковая воронка 2 помещается на молочную железу (рис. 1, *а*).

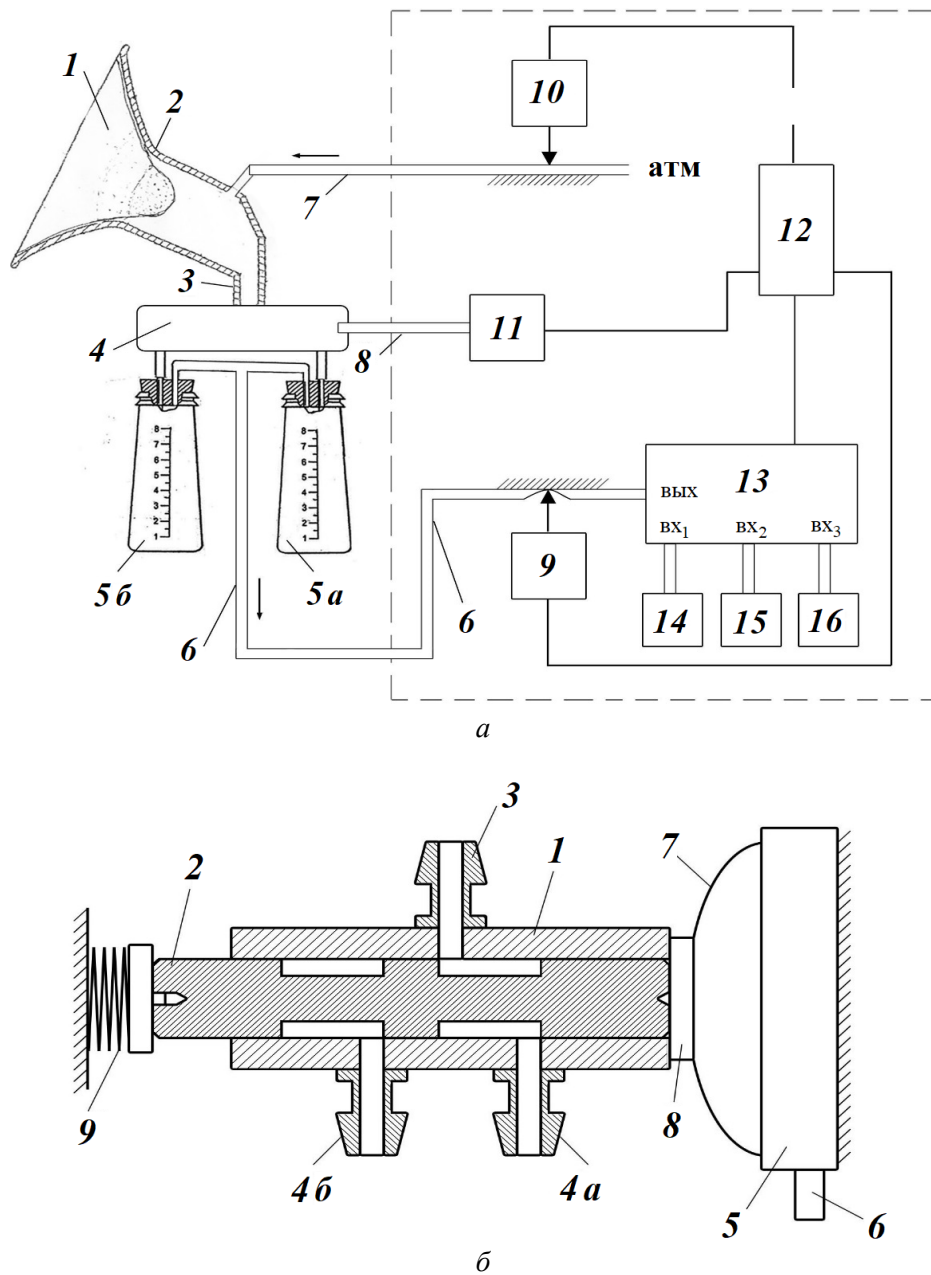


Рис. 1. Блок-схема установки (а) и схема переключателя молока (б);

а: 1 – молочная железа; 2 – пластиковая воронка; 3 – молокоотводящий патрубкок; 4 – переключатель молокосборников; 5 – молокосборники а и б; 6 – пневмопровод, подводящий вакуум к молокосборникам; 7 – пневмопровод, подводящий атмосферный воздух внутрь воронки 2; 8 – пневмопровод управления переключателем молокосборников; 9, 10 – пережимные клапаны; 11 – генератор импульсов избыточного давления; 12 – генератор электрических импульсов управления; 13 – переключатель источников вакуума; 14 и 15 – источники регулируемого вакуума; 16 – источник нерегулируемого вакуума

— Пневматическая связь; — электрическая связь

б: 1 – корпус, 2 – плунжер с двумя проточками, 3 – штуцер для связи с молокоотводящим патрубком, 4а и 4б – штуцеры для связи с молокосборниками, 5 – пневмоуправляемый толкатель, 6 – штуцер для подведения сжатого воздуха к пневмотолкателю, 7 – эластичная мембрана пневмотолкателя, 8 – жесткая пластинка, связанная с мембраной, 9 – пружина

Циклограммы работы блока управления представлены на рис. 2, а, б. На циклограмме 1 (рис. 2, а, б) заштрихованными прямоугольниками с номерами показано время, когда источники вакуума 14, 15, 16 подключены к выходу переключателя источников вакуума 13 (рис. 1, а). На штуцер б пневмотолкателя 5 (рис. 1, б) по пневмопроводу 8 (рис. 1, а) от генераторов импульсов избыточного давления 11 (рис. 1, а) в момент  $T_1$  поступает пневмоимпульс (циклограмма 5, рис. 2, а).

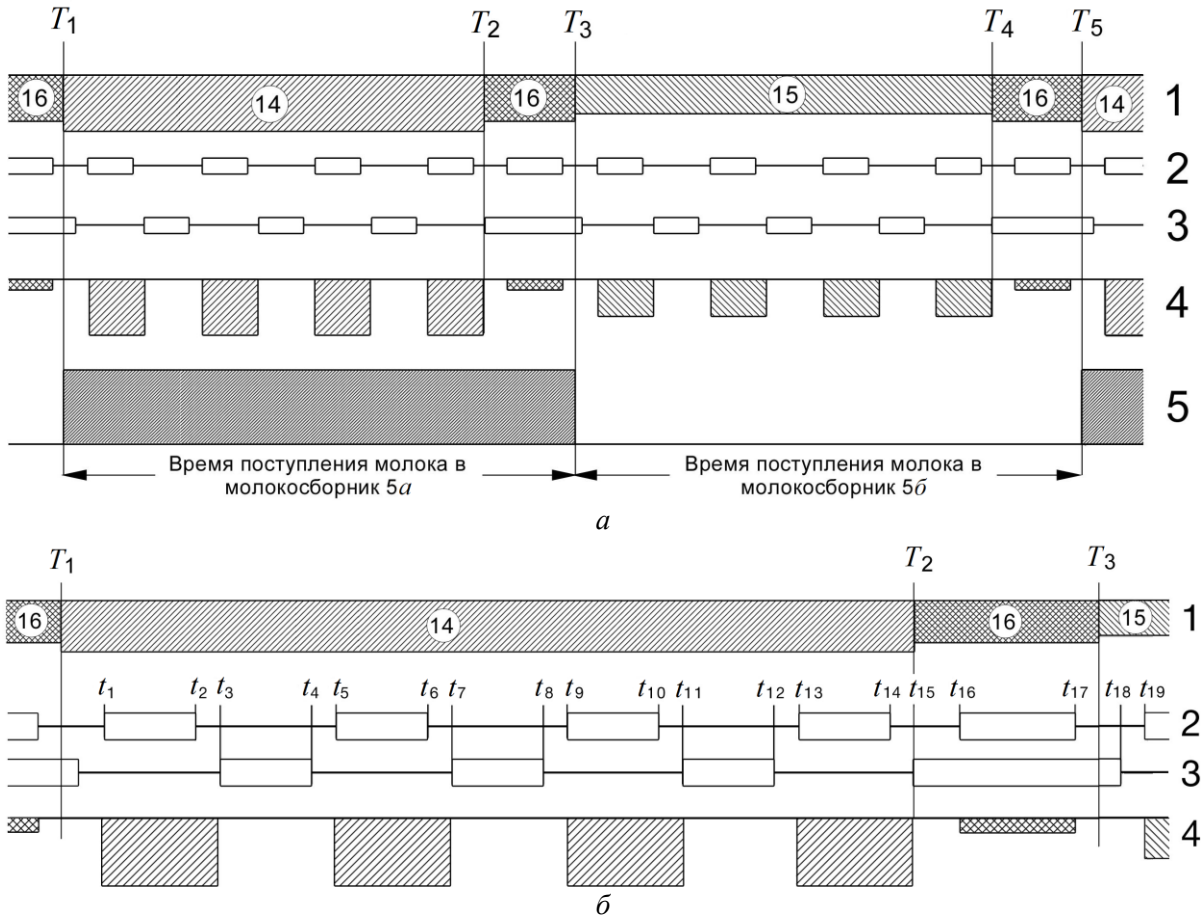


Рис. 2. Диаграммы, поясняющие работу экспериментальной установки:  $T_1-T_3$  – время воздействия импульса избыточного давления на пневмотолкатель переключателя молокосборников 4 (рис. 1, а).  $T_3-T_5$  – время отсутствия избыточного давления. Верхними заштрихованными прямоугольниками обозначено время, когда подключены источники вакуума 14, 15, 16 (рис. 1, а) к пневмопроводу б (1); циклограммы нахождения пневмопровода б (рис. 1, а), в открытом – изображено светлыми прямоугольниками и закрытом – изображено линией (2); циклограммы нахождения пневмопровода 7 (рис. 1, а) в открытом – изображено светлыми прямоугольниками и закрытом – изображено линией (3); циклограммы импульсов вакуума, создаваемые внутри воронки 2, изображены заштрихованными прямоугольниками (4)

Длительность импульса – временной интервал  $T_1-T_3$ . В результате этого воздействия пневмотолкатель 7 смещает плунжер 2 переключателя молокосборников в крайнее левое положение (рис. 1, б), сжимая при этом пружину 9. При нахождении плунжера 2 в этом положении устанавливается связь между штуцерами 3 и 4а, что обеспечивает связь между внутренним объемом пластиковой воронки 2, в которой находятся ареола и сосок молочной железы, и объемом молокосборника 5а. Затем в течение времени  $T_1-T_2$  (рис. 2, а) в пластиковой воронке 2 (рис. 1, а) формируются четыре импульса вакуума (циклограмма 4, рис. 2 а, б). Более подробно этот процесс представлен на рис. 2, б в момент  $T_1$ .

На циклограмме 2 (рис. 2, б) пневмопровод 6 открывается (показано светлым прямоугольником), и в молокосборники 5а и 5б поступает вакуум от источника вакуума 14. Соответственно вакуум устанавливается также внутри пластиковой воронки 2 (рис. 1, а). В момент  $t_2$  пневмопровод 6 пережимается (показано одинарной линией). Однако в замкнутом пространстве, включающем объем: пластиковой воронки с соском и ареолой 2 (рис. 1, а), молоковыводящей трубки 3 (рис. 1, а), выточек на плунжере 2 (рис. 1, б) и молокосборников (5а, 5б) (рис. 1, а), вакуум сохраняется. В момент времени  $t_3$ , когда пневмопровод 6 уже закрыт, пневмопровод 7 открывается на время  $t_3-t_4$ . В результате в воронку и в молокосборники поступает атмосферный воздух и вакуумный импульс заканчивается. Затем за временной интервал  $t_5-t_{15}$  происходит аналогичное формирование трех последующих импульсов вакуума. При таком способе создания импульсов вакуума в воронке поток воздуха в молокоотводящем патрубке 3 (рис. 1, а) всегда направлен в сторону молокосборников и заброс молока из молокоотводящего патрубка в воронку отсутствует.

Кроме того, для более полной транспортировки молока в молокосборник по окончании каждой серии импульсов вакуума в предлагаемой методике введен дополнительный импульс вакуума. Для этого в момент  $T_2$  в течение интервала  $T_2-T_3$  к выходу переключателя источников вакуума 13 (рис. 1, а) подключается дополнительный источник вакуума 16 (циклограмма 1, рис. 2, а и 2, б) и в момент  $T_{16}$  (рис. 2, б) на время  $t_{16}-t_{17}$  пневмопровод 6 открывается при открытом пневмопроводе 7 в течение времени  $t_{15}-t_{18}$ . При этих условиях дополнительный импульс может вызвать незначительное (не более 20 мм рт. ст.) увеличение вакуума внутри пластиковой воронки 2 (рис. 1, а), что показано на циклограмме 4 (рис. 2, а и 2, б) заштрихованным низкоамплитудным стимулом. Иницируемый дополнительным импульсом вакуума поток воздуха в направлении молокосборников будет эффективно «выдувать» остатки молока из молоковыводящего патрубка 3 (рис. 1, а) и из выточки на плунжере 2 (рис. 1, б) в молокосборник 5а, тем самым повышая точность измерений экспериментальной установки.

В момент  $T_3$  импульс избыточного давления в пневмопроводе 8 (рис. 1, а) заканчивается. Пружина 9 (рис. 1, б) переключателя молокосборников переводит плунжер 2 (рис. 1, б) в крайнее правое положение на время  $T_3-T_5$  (равное  $T_1-T_3$ ), при этом устанавливается связь между пластиковой воронкой 2 и молокосборником 5б. К выходу переключателя источников вакуума 13 (рис. 1, а) на временной интервал  $T_3-T_4$  подключается источник вакуума 15 (циклограмма 1, рис. 2, а) и начинают подаваться импульсы вакуума в пластиковую воронку 2 (рис. 1, а). Амплитуда этих импульсов в зависимости от программы может быть меньше или больше, чем у предыдущей серии импульсов. На рис. 2, а, б (циклограммы 4) стимулы вакуума выбраны меньше. Затем во временной интервал  $T_4-T_5$  вырабатывается дополнительный импульс вакуума (рис. 2, а). Далее чередующиеся между собой серии импульсов вакуума многократно повторяются, при этом происходит накопление выводимого из молочной железы молока в молокосборниках 5а и 5б.

Важное значение для сопоставления параметров вакуумных стимулов имеет длительность серий сравниваемых импульсов. В идеале количество сравниваемых вакуумных стимулов должно иметь соотношение 1:1. Однако в этом случае возрастают погрешности, обусловленные ошибками измерений. Поэтому число вакуумных стимулов в серии было выбрано равным четырем.

При проведении обследований сравнивался объем молока, выведенного с помощью базового вакуума (молокосборник а) и экспериментального вакуума (молокосборник б). Достоверность различия средних величин оценивали с помощью  $t$ -теста Стьюдента.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Вакуумные стимулы длительностью 0,5 с, частотой 1 имп/с и амплитудой 152 мм рт. ст. были выбраны в качестве базовых. Базовые вакуумные стимулы и экспериментальные стимулы различной амплитуды в наших опытах имели время нарастания восходящей и время спада нисходящей фазы около 0,05 с. Надо отметить, что молоко в емкостной системе молочной железы находится при атмосферном давлении. Создание вакуума на выходе молочных протоков, т.е. создание разности давлений, заставляет молоко выходить из железы. Скорость движения молока согласно законам гидродинамики будет увеличиваться с повышением разности давлений между молоком в протоковой системе железы и объеме выносной накладки. Количество молока, выведенное с помощью вакуумных стимулов амплитудой 152 мм рт. ст., сравнивалось с объемом молока, выведенного за то же время с помощью вакуумных стимулов амплитудой 76; 114 и 190 мм рт. ст. Результаты обследований для каждого значения вакуумных стимулов были даны в виде гистограмм (рис. 3), представляющих отношение между количеством молока, выведенного с помощью базового вакуумов (молокосборник *a*) и экспериментального (молокосборник *б*).

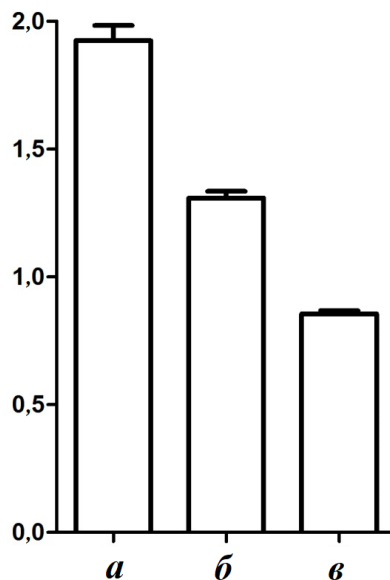


Рис. 3. Влияние амплитуды вакуумных стимулов на объем выведенного молока. Отношение между количеством молока, выведенного с помощью базового вакуума 152 мм рт. ст. и соответственно 76 (*a*); 114 (*б*); 190 мм рт. ст. (*в*). По оси ординат отложено отношение между количеством молока, выведенного с помощью базового (молокосборник *a*) и экспериментального вакуумов (молокосборник *б*)

Для проверки симметричности системы в начале обследования у 5 пациенток в молокосборники *a* и *б* поступало молоко, выведенное с помощью стимулов вакуума одинаковой амплитуды – 152 мм рт. ст. При равенстве вакуума в объеме выносной накладки и, соответственно, в молокосборниках количество молока в молокосборниках достоверно не отличалось и соотношение между выведенным объемом молока в двух молокосборниках составило  $1,02 \pm 0,03$ , что указывает на симметричность системы. В дальнейшем у этих пациенток и еще добавленных пяти пациенток сравнивался объем молока, выведенный с помощью базовых вакуумных стимулов и экспериментальных стимулов (рис. 3). При сравнении объема молока  $V_a$ , выведенного с помощью базовых стимулов вакуума с амплитудой 152 мм рт. ст., и экспериментальных стимулов  $V_b$  76 мм рт. ст., отношение  $V_a/V_b$  составило  $1,9 \pm 0,2$  (рис. 3, *a*). Оно достоверно не отличалось от отношения между амплитудами

вакуумных стимулов 152 мм рт. ст. / 76 мм рт. ст. = 2. Для стимулов вакуума 152 и 114 мм рт. ст. отношение  $Va/Vб$  составило  $1,3 \pm 0,1$  (рис.3, б) и достоверно не отличалось от отношения между амплитудами вакуумных стимулов 152 мм рт. ст. / 114 мм рт. ст. = 1,3. Соответственно, для стимулов вакуума 152 и 190 мм рт. ст. (рис. 3, в) отношение  $Va/Vб$  составило  $0,8 \pm 0,04$  и достоверно не отличалось от отношения между амплитудами вакуумных стимулов 152 мм рт. ст. / 190 мм рт. ст. = 0,8. Таким образом, количество молока увеличивается с повышением амплитуды вакуумных стимулов (рис. 3) и пропорции между отношением количества молока, выведенного с помощью базового импульса вакуума и экспериментальными импульсами вакуума, достоверно не отличаются. Вместе с тем стандартные отклонения для соотношений выведенного молока с помощью вакуумных стимулов были наибольшими для 152 и 76 мм рт. ст. и заметно отличались от таковых для пар вакуумных стимулов 152 и 114 мм рт. ст. и 152 и 190 мм рт. ст. (рис. 3). Возможной причиной этих расхождений является повышение внутрипротокового давления при формировании рефлексов выведения молока в ответ на стимуляцию механорецепторов ареолярно-соскового комплекса молочной железы [1, 6].

Так, например, при выведении молока импульсами вакуума 152 и 76 мм рт. ст. в случае повышения давления внутри протоков на 15,2 мм рт. ст. разность давлений между альвеолярно-протоковым объемом и внешней средой, за счет чего выводится молоко, увеличится соответственно:  $152 + 15,2 = 167,2$  мм рт. ст., а для  $76 + 15,2 = 91,2$  мм рт. ст. Однако соотношение 152 мм рт. ст. / 76 мм рт. ст. = 2 не сохранится, а уменьшится до 1,83. Соответственно изменится соотношение между количеством выведенного молока. При этом прибавка в большей степени скажется на действии более низкоамплитудного стимула. Определить конкретный вклад рефлекторных пиков давления весьма затруднительно, поскольку амплитуда, длительность и последовательность пиков варьируются во время всего времени выведения молока [1, 6]. Вместе с тем эти данные указывают на то, что за счет формирования рефлекторных пиков внутрижелудочного давления выведение молока является активным процессом. Поскольку разность давления между молоком в протоках и внешней средой является одним из главных факторов для эффективного выведения молока, повышение амплитуды вакуумных стимулов будет сопровождаться увеличением количества выведенного молока. Однако, как показали обследования, повышение вакуума до 228 мм рт. ст. вызывает часто болевые ощущения у женщин, что в итоге в результате стресса [9] снижает количество выведенного молока. В наших обследованиях было обнаружено, что для большинства женщин оптимальной амплитудой является значение около 190 мм рт. ст., что совпадает с ранее полученными данными *Kent et al.* [5].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев Н.П., Ярославский В.К., Гайдуков С.Н., Ильин В.И., Спесивцев Ю.А., Тихонова Т.К., Кулагина Н.Б. Роль вакуумных и тактильных стимулов в процессе выведения молока из молочной железы женщины // Физиологический журнал им. И.М. Сеченова. – 1994. – № 10. – С. 67–74.
2. Алексеев Н.П., Омелянюк У.В., Талалаева Н.Е. Изменение временных параметров стимулов сжатия при выведении молока во время кормления ребенка // Физиологический журнал им. И.М. Сеченова. – 2003. – № 11. – С. 1396–1403.
3. Алексеев Н.П., Ильин В.И. Оптимизация биомеханики стимулов вакуума в аппарате с компонентой сжатия для выведения молока из молочной железы лактирующей женщины // Российский журнал биомеханики. – 2015. – Т. 19, № 4. – С. 430–438.
4. Fewtrell M.S., Lucas P., Collier S., Singhal A., Ahluwalia J.S., Lucas A. Randomized trial comparing the efficacy of a novel manual breast pump with a standard electric breast pump in mothers who delivered preterm infants // Pediatrics. – 2001. – Vol. 107, № 6. – P. 1291–1297.
5. Kent J.C., Mitoulas L.R., Cregan M.D., Geddes D.T., Larsson M., Doherty D.A., Hartmann P.E. Importance of vacuum for breastmilk expression // Breastfeed. Med. – 2008. – Vol. 3. – P. 11–19.

6. Meier P.P., Engstrom J.L., Janes J.E., Jegier B.J., Loera F. Breast pump suction patterns that mimic the human infant during breastfeeding: greater milk output in less time spent pumping for breast pump-dependent mothers with premature infant // *J. Perinatol.* – 2012. – Vol. 32, № 2. – P. 103–110.
7. Prime D.K., Geddes D.T., Spatz D.L., Robert M., Trengove N.J., Hartmann P.E. Using milk flow rate to investigate milk ejection in the left and right breasts during simultaneous breast expression in women // *Int. Breastfeed J.* – 2009. – Vol. 4, № 10. – P. 1–10.
8. Rasmussen K.M., Geraghty S.R. The quiet revolution: breastfeeding transformed with the use of breast pumps // *Am. J. Public Health.* – 2011. – Vol. 101, № 8. – P. 1356–1359.
9. Ueda T., Yokoyama Y., Irahara M., Aono T. Influence of psychological stress on suckling-induced pulsatile oxytocin release // *Obstet. Gynecol.* – 1994. – Vol. 84. – P. 259–262.

## **OPTIMIZATION OF THE AMPLITUDE OF THE VACUUM STIMULI IN BREAST PUMP**

**V.I. Ilyn, N.P. Alekseev (Saint-Petersburg, Russia),  
M.M. Troschkin, V.A. Ulezko (Tula, Russia)**

Breastfeeding, due to its nutritional and immunological aspects, is the best source of food for a newborn. In a situation where it is not possible to breastfeed her baby, for example, when the mother has returned to work or is otherwise temporarily separated from her baby, it is necessary for her to express breast milk for storage and use during the period of separation. Also, if infant is unable to effectively draw out the milk, for example, due to premature birth, illness, or underdeveloped nursing reflex, it may be necessary to express the milk from the mother's breast using a breast pump. To achieve lactation success before a suckling can ensure the effective extraction of milk, breast pumps must meet specific mechanical requirements. However, the parameters of the vacuum stimuli by which milk is produced remain non-optimized. A method was developed to compare the amount of milk ejected by vacuum pulses of different amplitudes. Milk was ejected during one session alternately by series of vacuum pulses of different amplitudes into separate containers in the same woman. In order to minimize the influence of reflex pressure increase in the gland duct system on milk excretion, the vacuum stimuli with the help of a special switch were grouped into a series of 4 vacuum pulses periodically following each other with a duration of 4 s series. In addition, to increase the accuracy of measuring the amount of milk at the end of each series of vacuum pulses, an additional vacuum pulse was introduced, with the help of which an air flow in the direction of the milk collectors was created, contributing to the removal of milk residues from the conductive paths of the switch. It was found that for most nursing women the optimal amplitude of the vacuum is about 190 mm Hg.

**Key words:** lactation, breast pump, biomechanic vacuum stimuli, amplitude optimization.

*Получено 21 Апреля 2018*