

DOI: 10.15593/RZhBiomeh/2016.4.01  
УДК 531/534:[57+61]



## ИССЛЕДОВАНИЕ СЖИМАЕМОСТИ БРЮШНОГО СОДЕРЖИМОГО

В.С. Туктамышев<sup>1</sup>, Е.Ю. Касатова<sup>2</sup>, Е.А. Трухачева<sup>3</sup>, А.В. Касатов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Кафедра теоретической механики и биомеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета, Россия, 614990, Пермь, Комсомольский проспект, 29, e-mail: helpinvader@list.ru

<sup>2</sup> Кафедра акушерства и гинекологии факультета дополнительного профессионального образования Пермского государственного медицинского университета имени академика Е.А. Вагнера, Россия, 614990, Пермь, ул. Петропавловская, 26, e-mail: elena.kasatova@googlemail.com

<sup>3</sup> Ордена «Знак Почета» Пермская краевая клиническая больница, Россия, 614990, Пермский край, г. Пермь, ул. Пушкина, 85, e-mail: a.kasatov@gmail.com

**Аннотация.** Создание биомеханической модели брюшной полости, позволяющей прогнозировать величину внутрибрюшного давления при различных физиологических и патологических состояниях, является актуальной задачей. Разработка такой модели тесно связана с природой внутрибрюшного давления. В научной литературе можно встретить работы, в которых утверждается, что брюшную полость можно представить как контейнер, наполненный несжимаемой жидкостью. Однако степень сжимаемости брюшного содержимого до сих пор не изучена. Представленная работа посвящена экспериментальному исследованию, в котором сделана попытка определения величины сжатия объема полости живота при сокращении мышц переднебоковой брюшной стенки (брюшного пресса). В качестве исходных данных использовались компьютерные томограммы брюшной полости испытуемого в расслабленном состоянии и при сокращении брюшного пресса. В дальнейшем эти томографические изображения анализировались с помощью приложения, созданного в программной среде пакета *Matlab*. Обработка экспериментальных данных выявила уменьшение объема брюшного пространства испытуемого всего на 2 %. Полученный результат позволяет сделать вывод о том, что содержимое брюшной полости можно считать несжимаемым. Это доказывает справедливость ранее упомянутого утверждения о том, что в качестве модели брюшной полости человека можно рассматривать контейнер, наполненный несжимаемой жидкостью.

**Ключевые слова:** брюшное содержимое, несжимаемость, обработка томографических изображений.

### ВВЕДЕНИЕ

Разработка биомеханической модели брюшной полости, которая позволила бы адекватно прогнозировать изменение внутрибрюшного давления, тесно связана с природой этого физиологического параметра [2–7]. В статье [1] было показано, что давление в полости живота является результатом взаимодействия брюшного содержимого с брюшной стенкой. Такое взаимодействие обусловлено несколькими причинами: с одной стороны, силой тяжести, действующей на содержимое полости, с другой – напряжениями в тканях брюшной оболочки, возникающими либо при

---

© Туктамышев В.С., Касатова Е.Ю., Трухачева Е.А., Касатов А.В., 2016

Туктамышев Вадим Саитзянович, к.ф.-м.н., доцент кафедры теоретической механики и биомеханики, Пермь  
Касатова Елена Юрьевна, к.м.н., доцент кафедры акушерства и гинекологии факультета дополнительного профессионального образования, Пермь

Трухачева Елена Аркадьевна, заведующая кабинетом компьютерной томографии, Пермь

Касатов Анатолий Владимирович, к.м.н., главный врач Пермской краевой клинической больницы, Пермь

увеличении ее объема, либо при сокращении мышц брюшной стенки. Кроме того, согласно выводам работ [7, 9] брюшная полость человека аналогична контейнеру, наполненному несжимаемой жидкостью, которая подчиняется законам гидростатики, в частности закону Паскаля [8]. Следуя данному утверждению, разнообразие элементов содержимого полости живота (желудок, кишечник, сосуды и т.д.) можно представить однородной несжимаемой жидкостью, что значительно упростит создание упомянутой модели. Однако для выполнения такого упрощения необходимо, чтобы содержимое брюшной полости человека обладало свойством несжимаемости. Важно отметить, что изучение этого свойства применительно к органам живота до настоящего времени не проводилось.

В представленной работе с целью определения степени сжимаемости брюшного содержимого проводится эксперимент по исследованию изменения объема полости живота при сокращении мышц переднебоковой брюшной стенки. Измерение искомой величины при этом производится с помощью анализа компьютерных томограмм.

### ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

В экспериментальном исследовании принял участие мужчина в возрасте двадцати лет, не имеющий на момент проведения эксперимента заболеваний органов брюшной полости. Компьютерная томография была выполнена в Пермской краевой клинической больнице на спиральном компьютерном томографе с возможностью получения 128 срезов *Optima CT660* производства *GE Medical Systems*.

Описываемое исследование можно представить как последовательность двух опытов. Компьютерная томография в ходе первого опыта была выполнена в ситуации, когда испытуемый, сделав максимальный вдох, расслабил мышцы переднебоковой брюшной стенки (мышцы брюшного пресса). Второй опыт был проведен аналогично первому, за исключением того, что испытуемым было осуществлено сокращение мышц брюшного пресса. Целесообразность выполнения второго опыта обусловлена тем, что усилия, развиваемые в данных мышцах, позволяют реализовать необходимое сжатие содержимого полости живота.

Процесс обработки томографических изображений производился с помощью приложения, созданного в программной среде пакета *Matlab*. Следует отметить, что данное приложение позволяет наносить границы исследуемой области непосредственно на томографическом снимке (рис. 1). При этом граница представляет собой ломаную линию, координаты узлов которой можно обозначить через  $x_i, y_i$  ( $i = \overline{1, n}$ , где  $n$  – число узлов).

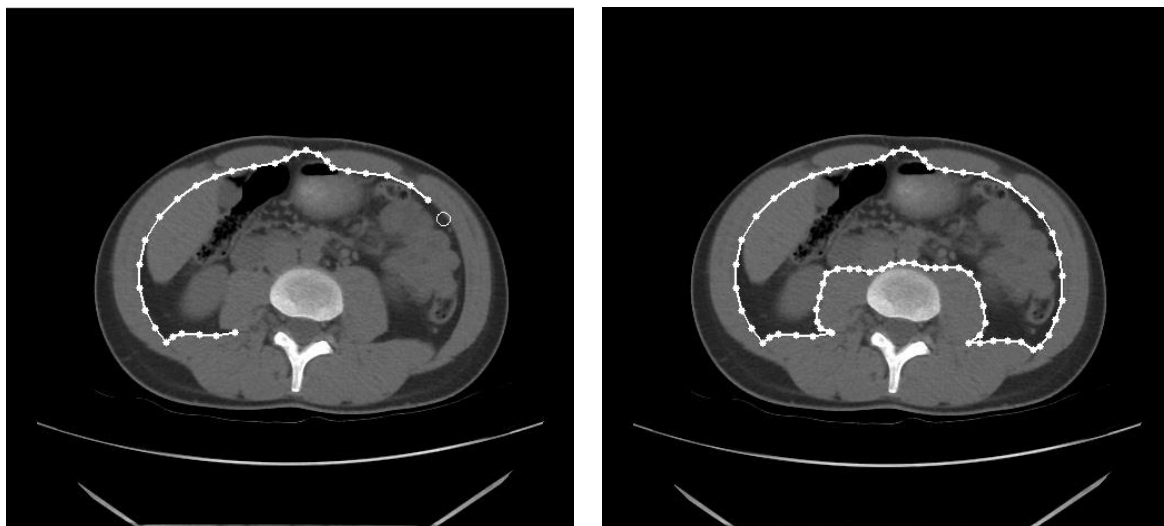


Рис. 1. Построение контура брюшной полости на текущем снимке

Применение возможностей созданного приложения к томографическим данным, полученным в процессе выполнения эксперимента, позволяет восстановить контуры брюшной полости испытуемого на каждом снимке. По известным координатам узлов замкнутого контура, построенного на  $k$ -м снимке ( $k = \overline{1, m}$ , где  $m$  – число снимков в серии), можно вычислить площадь  $S_k$  соответствующего многоугольника:

$$S_k = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (x_i + x_{i+1})(y_i - y_{i+1}),$$

где  $x_{n+1} = x_1$ ,  $y_{n+1} = y_1$ . Приближенное значение объема  $V$  полости, в свою очередь, выражается следующей формулой:

$$V = \sum_{k=1}^m S_k h, \quad (1)$$

где  $h$  – шаг между томографическими изображениями. Необходимо отметить, что для проведения излагаемого исследования был выбран шаг, равный 5 мм.

Как следует из представленного описания, в ходе проведения эксперимента были получены две серии компьютерных томограмм брюшной полости: первая – при расслабленном состоянии мышц переднебоковой брюшной стенки; вторая – при сокращении этих мышц. Каждая серия включала в себя 60 снимков ( $m = 60$ ), соответствующих рентгенологическим изображениям сечений живота от купола диафрагмы до тазового дна (рис. 2). Обозначив за  $V_1$  и  $V_2$  объемы брюшного пространства при расслабленном и напряженном брюшном прессе, введем коэффициент  $k$  сжимаемости брюшного содержимого

$$k = \frac{V_1}{V_2}.$$

С учетом соотношения (1) последняя формула примет следующий вид:

$$k = \sum_{k=1}^m S_{1k} / \sum_{k=1}^m S_{2k}. \quad (2)$$

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод о том, что вычисление коэффициента  $k$  с помощью выражения (2) позволит оценить степень сжимаемости брюшного содержимого при действии на него усилий со стороны мышц брюшного пресса.



Рис. 2. Сакральное сечение туловища испытуемого. Показаны уровни первого и последнего снимков последовательности рассматриваемых изображений

## РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате вычислений, проведенных в процессе анализа томографических снимков полости живота испытуемого, было получено искомое значение коэффициента сжимаемости брюшного содержимого

$$k = 1,02.$$

Несмотря на кажущееся сжатие брюшного пространства во время сокращения мышц переднебоковой брюшной стенки, уменьшение объема полости живота испытуемого в ходе выполнения эксперимента составило всего 2 %. Исследование томографических изображений показало, что мышечные усилия, действующие со стороны брюшного пресса, вызывают перемещение некоторой части брюшного содержимого в направлении тазового дна (рис. 3). При этом наблюдалось значительное уменьшение объема в верхнем сегменте полости живота, которое вместе с тем компенсировалось расширением брюшного пространства в области таза. На рис. 3 сечение, разделяющее указанные сегменты, обозначено линией А.

Причиной наблюдаемого перераспределения брюшных масс, по-видимому, является стремление определенной части содержимого полости живота к перемещению в ту зону брюшного пространства, в которой действует наименьшее давление со стороны мышц брюшной стенки. Такой зоной является область таза, поскольку нижняя часть брюшного пресса менее развита, чем верхняя.

Найденное значение коэффициента  $k$  позволяет сделать вывод о том, что содержимое брюшной полости является практически несжимаемым. Следует отметить, что величина данного коэффициента не является точной ввиду наличия разнообразных погрешностей (возможные несоответствия построенных контуров реальным границам брюшной полости, наличие газов в кишечнике испытуемого и т.д.). Несмотря на это, предполагается, что указанные погрешности не влияют на полученное значение параметра  $k$ .

Таким образом, можно утверждать, что брюшная полость человека подобна контейнеру, наполненному несжимаемой жидкостью. Изучение механических свойств этой системы является целью будущих исследований.

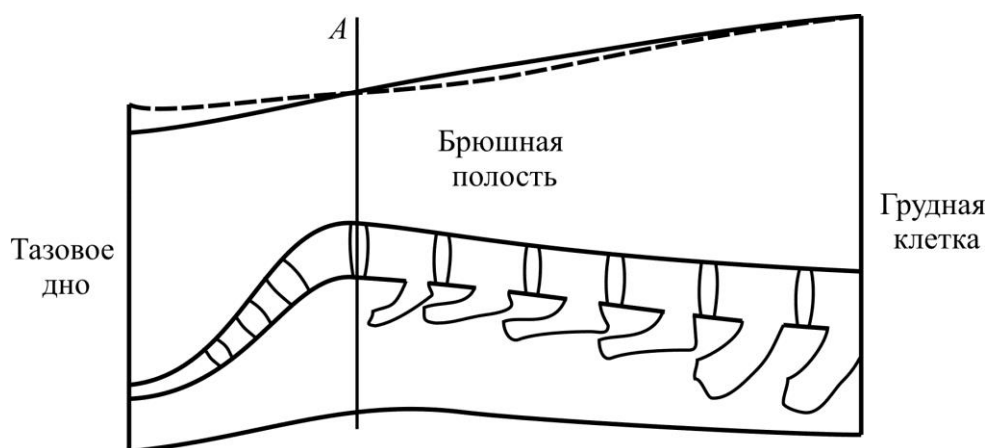


Рис. 3. Схематическое изображение сагиттального сечения туловища испытуемого. Показаны контуры брюшной полости, соответствующие внутренней поверхности передней стенки живота, для расслабленного состояния (сплошная линия) и при наличии сокращения мышц брюшного пресса (пунктирная линия)

## Выводы

Давление на брюшное содержимое, оказываемое переднебоковой брюшной стенкой, значительно возрастает при наличии усилий в мышцах брюшного пресса. Представленная работа посвящена экспериментальному исследованию степени сжимаемости содержимого полости живота при сокращении этих мышц. Уменьшение объема брюшного пространства испытуемого в ходе выполнения эксперимента составило 2 %. Полученный результат позволяет сделать вывод, что в качестве модели брюшной полости человека можно рассматривать контейнер, наполненный несжимаемой жидкостью.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Туктамышев В.С. О природе внутрибрюшного давления // Российский журнал биомеханики. – 2015. – Т. 20, № 3. – С. 200–208.
2. Туктамышев В.С., Касатова Е.Ю., Няшин Ю.И. Исследование зависимости между давлением выдыхаемого воздуха и внутрибрюшным давлением человека // Российский журнал биомеханики. – 2015. – Т. 19, № 1. – С. 73–78.
3. Туктамышев В.С., Кучумов А.Г., Няшин Ю.И., Самарцев В.А., Касатова Е.Ю. Внутрибрюшное давление человека // Российский журнал биомеханики. – 2013. – Т. 17, № 1. – С. 22–31.
4. Caldwell C.B., Ricotta J.J. Changes in visceral blood flow with elevated intra-abdominal pressure // Journal of Surgery Research. – 1987. – Vol. 43. – P. 14–20.
5. Calvo B., Sierra M., Grasa J., Munoz M.J., Pena E. Determination of passive viscoelastic response of the abdominal muscle and related constitutive modeling: Stress-relaxation behavior // Journal of Mechanical Behavior of Biomedical Materials. – 2014. – Vol. 36. – P. 47–58.
6. Kuntscher M.V., Germann G., Hartmann B. Correlations between cardiac output, stroke volume, central venous pressure, intra-abdominal pressure and total circulating blood volume in resuscitation of major burns // Resuscitation. – 2006. – Vol. 70, № 1. – P. 37–43.
7. Loring S.H., Yoshino K., Kimball W.R., Barnas G.M. Gravitational and shear-associated pressure gradients // Journal of Applied Physiology. – 1994. – Vol. 77, № 3. – P. 1375–1382.
8. Malbrain M.L., Cheatham M.L., Kirkpatrick A., Sugrue M., Parr M., De Waele J., Balogh Z., Leppaniemi A., Olvera C., Ivatury R., D'Amours S., Wendon J., Hillman K., Johansson K., Kolkman K., Wilmer A. Results from the International Conference of Experts on Intra-abdominal Hypertension and Abdominal Compartment Syndrome. I. Definitions // Intensive Care Medicine. – 2006. – Vol. 32, № 11. – P. 1722–1732.
9. Tzelepis G.E., Nasiff L., McColl F.D., Hammond J. Transmission of pressure within the abdomen // Journal of Applied Physiology. – 1996. – Vol. 81, № 3. – P. 1111–1114.

## THE STUDY OF COMPRESSIBILITY OF ABDOMINAL CONTENTS

V.S. Tuktamyshev, E.Y. Kasatova, E.A. Truhacheva, A.V. Kasatov (Perm, Russia)

The creating of biomechanical model of the abdominal cavity, which allows us to predict the amount of intra-abdominal pressure during various physiological and pathological conditions is an urgent task. Development of such a model is closely connected with the nature of intra-abdominal pressure. In the scientific literature, we can find studies which state that the abdominal cavity can be represented as a container filled with an incompressible fluid. However, the degree of compressibility of the abdominal contents has not yet been studied enough. This work is devoted to experimental research, which attempts to determine the amount of compression of the abdominal cavity volume during contraction of the anterolateral abdominal wall muscles (abdominal press). As the initial data, we used computed tomography scans of the abdomen of the volunteer, obtained as a result of X-ray studies in a relaxed state and in contraction of abdominal press. Then, these tomographic images were analyzed using an application that was created in a Matlab software. The experimental data revealed a decrease of abdominal space volume of the volunteer only by 2 %. This result leads to the conclusion that the abdominal contents can be considered as incompressible. This proves the validity of the previously mentioned approval that as a model of human abdominal cavity we can use a container filled with an incompressible fluid.

**Key words:** abdominal contents, incompressibility, tomographic image processing.

*Получено 30 ноября 2016*