

УДК 532:[612+613]

ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МОТОРИКИ АНТРОДУОДЕНАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ ПИЩЕВАРИТЕЛЬНОГО ТРАКТА ДЛЯ ЗАДАЧ ОЦЕНКИ РИСКА ЗДОРОВЬЮ ПРИ ПЕРОРАЛЬНОЙ ЭКСПОЗИЦИИ ХИМИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ*

М.Р. Камалтдинов

ФБУН «Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения», Россия, 614045, г. Пермь, ул. Монастырская, 82
ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29

В рамках многоуровневой модели накопления функциональных нарушений в организме человека под воздействием факторов среды обитания разрабатывается подмодель «мезоуровня» пищеварительной системы. Статья посвящена проблемам реконструкции трехмерной формы антродуоденальной области желудочно-кишечного тракта и расчета сдвигов узлов расчетной сетки при прохождении волны сокращения в антральном отделе и моторной активности пилорического сфинктера. Рассмотренные подходы могут быть применены для задач оценки риска здоровью при пероральной экспозиции химических веществ.

Ключевые слова: математическое моделирование, пищеварительная система, желудок, эволюция риска здоровью, перистальтические волны.

В рамках решения задач оценки влияния факторов среды обитания на здоровье человека, а также прогнозирования развития функциональных нарушений в человеческом организме, связанных с химическими, физическими, социальными и др. факторами, разрабатывается многоуровневая математическая модель [8]. Верхний уровень (или «макроуровень») модели накопления функциональных нарушений – организм в целом, второй уровень (или мезоуровень) – отдельные органы и системы. На основе предлагаемой многоуровневой модели разработаны подходы к оценке интегрального и популяционного риска здоровью [1, 4, 5], методы расчета дополнительных случаев заболеваемости и смертности, обусловленных действием факторов среды обитания [2].

Необходимость установления кинетических зависимостей для химических веществ, поступающих из продуктов питания и питьевой воды в человеческий организм, обуславливает целесообразность развития подмодели «мезоуровня» пищеварительной системы. При пероральной экспозиции химических веществ можно выделить два механизма эволюции риска нарушений пищеварительной системы – непосредственное раздражающее действие химических веществ, содержащихся в полости желудочно-кишечного тракта, на стенку тракта, и негативное воздействие химических веществ, содержащихся в крови, омывающей органы пищеварительной системы. Кроме того, вещества, поступающие в организм через желудочно-кишечный тракт, посредством кровеносной системы могут оказы-

© Камалтдинов М.Р., 2014

Камалтдинов Марат Рашидович – младший научный сотрудник, аспирант (e-mail: kamaltdinov@fcrisk.ru; тел.: 8 (342) 237-18-04).

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №12-01-00547-а.

вать воздействие и на другие органы и системы, увеличивая риск нарушений здоровья. Таким образом, для оценки риска здоровью при пероральной экспозиции химических веществ в рамках эволюционного моделирования необходим динамический расчет концентраций в полости желудочно-кишечного тракта и кровеносной системе.

Следует заметить, что для решения поставленной задачи необходима соответствующая степень разработанности подмодели пищеварительной системы на «макроуровне» и подмоделей «мезоуровня» – ротовой полости, желудка, кишечника, что в совокупности представляет достаточно объемную проблему. В этой связи в статье рассмотрен только небольшой фрагмент работы, посвященный одной из наиболее интересных подзадач – трехмерному моделированию процесса течения в антродуоденальном отделе желудка с учетом перистальтических волн.

На сегодняшний день с совершенствованием экспериментальных методов исследований, особенно в области получения изображений органов и систем пищеварительной системы (причем зачастую в динамике, позволяющей отследить процесс во времени), бурное развитие получили междисциплинарные подходы – применение методов математического моделирования в физиологии, биологии и биохимии пищеварения. Широко используемые для оценки концентраций веществ в кровеносной, пищеварительной и других системах человеческого организма кинетические камерные модели [6, 7] не позволяют проследить пространственные характеристики процессов, так как в основном базируются на системе обычных дифференциальных уравнений с переменной времени. В этой связи представляется целесообразным оценивать поступление химических веществ через пероральный путь методами механики сплошной среды (гидродинамики) с применением дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих пространственно-временные закономерности. Одним из преимуществ такого подхода является

физиологичность – возможность моделирования основных процессов пищеварения, в том числе всасывание и секрецию (диффузионные процессы), моторику стенок тракта, дробление и растворение пищи, биохимические реакции в полости желудочно-кишечного тракта.

Несмотря на то что в последнее десятилетие начинают развиваться подходы к численному моделированию процесса течения в различных участках пищеварительного тракта – пищеводе, желудке и кишечнике, до сих пор количество трехмерных моделей очень ограничено [14, 24, 27]. Наибольший интерес с точки зрения механики представляют модели течения в антродуоденальной области тракта [9, 12], так как в этом отделе наиболее явно выражены эффекты перемешивания, гомогенизации смеси, обусловленные интенсивной моторной деятельностью мускулатуры стенок [17]. Работы в данном направлении требуют дальнейшего развития – учет указанных выше основных процессов пищеварения, а также нейроэндокринной регуляции и функциональных нарушений органов.

На текущий момент в рамках модели «мезоуровня» пищеварительной системы введены основные понятия и определения, разработана концептуальная постановка, обозначены пути развития подмодели, одним из которых является переход к трехмерной задаче [8]. В данной статье тезисно рассмотрены подходы к реконструкции трехмерной формы антродуоденальной области желудочно-кишечного тракта и определению сдвигов узлов расчетной сетки при прохождении волны сокращения в антральном отделе и моторной активности пилорического сфинктера.

Экспериментальные методы – ультразвуковые исследования (УЗИ) и магнитно-резонансная томография (МРТ) позволяют получать снимки внутренних органов высокого разрешения в различных сечениях с малым временным интервалом. Результаты МРТ используются для определения размеров частиц, отслеживания моторной

активности тракта, скорости желудочной эвакуации [16, 22]. К основным недостаткам МРТ относится дороговизна оборудования, кроме того, обследование проводится в положении лежа, при котором распределение пищи в тракте отличается в сравнении с положением сидя и стоя [13]. Результаты УЗИ используются для построения геометрической формы органов и оценки двигательной активности ЖКТ [10, 26], при этом если методы восстановления трехмерной формы органов по двухмерным снимкам МРТ и УЗИ достаточно хорошо разработаны [11, 18, 20, 21, 24], то для моделирования волны перистальтики желательнее располагать аналитическим описанием поверхности органа. В силу межиндивидуальной вариабельности размеров и форм органов пищеварительного тракта [22] для построения упрощенной поверхности антродуоденальной области достаточно сведений из анатомических атласов, тем не менее параметры моторной активности (а особенно при функциональных нарушениях) представляется целесообразным определять из эксперимента.

Рассмотрим тезисно алгоритм реконструкции трехмерной формы антродуоденальной области желудочно-кишечного тракта по результатам УЗИ.

1. Геометрическая форма объекта моделирования включает в себя антральный отдел желудка и небольшой участок смежного отдела двенадцатиперстной кишки. В результате проведения УЗИ получены снимки желудка (вертикальное положение тела человека) в плоскостях, параллельных двум основным анатомическим плоскостям: горизонтальной (параллельной уровню земли) и срединной (разделяющей тело человека на две симметричные половины). В первом приближении выполнена оценка размеров желудка и определены опорные точки на вогнутой и выпуклой части антрального отдела в третьем основном (фронтальном) анатомическом сечении (плоскости XU). Вогнутая и выпуклая стенки желудка в плоскости XU аппроксимированы полиномами 6-й степени.

2. Центральная линия антрального отдела желудка определяется как средняя линия между кривыми, аппроксимирующими вогнутую и выпуклую стенку желудка, расположена в плоскости XU и аппроксимирована полиномом 6-й степени.

3. На следующем этапе проводится построение конечного числа эллипсов переменных радиусов, которые будут являться основой для аппроксимации трехмерной поверхности желудка, центры эллипсов лежат на центральной линии, а эллипс лежит в нормальной плоскости (нормальной плоскостью к пространственной кривой называется плоскость, перпендикулярная к касательной прямой и проходящая через точку касания) к центральной линии. Большая ось эллипса r_1 расположена в плоскости XU , малая ось r_2 перпендикулярна плоскости XU , отношение r_1 и r_2 в области антрального отдела желудка и области пилорического отверстия предполагается постоянным и равным 0,613 (оценка выполнена на основе данных УЗИ).

4. Рассчитанные координаты опорных эллипсов экспортированы в *Ansys Design Modeler*, аппроксимация трехмерной поверхности выполнена инструментом *skin/loft* (рис. 1).

Сегмент с наименьшим радиусом соответствует области пилорического сфинктера. Большая ось эллиптического сечения сегмента r_1 изменяется по синусоидальному закону, в который введены параметры, соответствующие открытому/закрытому состоянию сфинктера (что соответствует изменению диаметра пилорического отверстия в плоскости XU в наиболее узком месте от 0,00923 до 0,00102 м). Полное закрытие сфинктера моделируется малым отверстием, чтобы обеспечить существование решения уравнений движения среды и устойчивость численных расчетов в области пилорического отверстия. В дальнейшем должны быть введены дополнительные критерии на состояние сфинктера (достаточная степень измельчения пищи, кислот-

ность среды). Центральная линия кишечника в первом приближении описывается квадратичной зависимостью от координаты x , радиус r_1 и r_2 изменяются линейно до

величины 0,014 м, таким образом, сечение кишечника на левой границе принимает форму круга, что соответствует данным анатомических справочников.

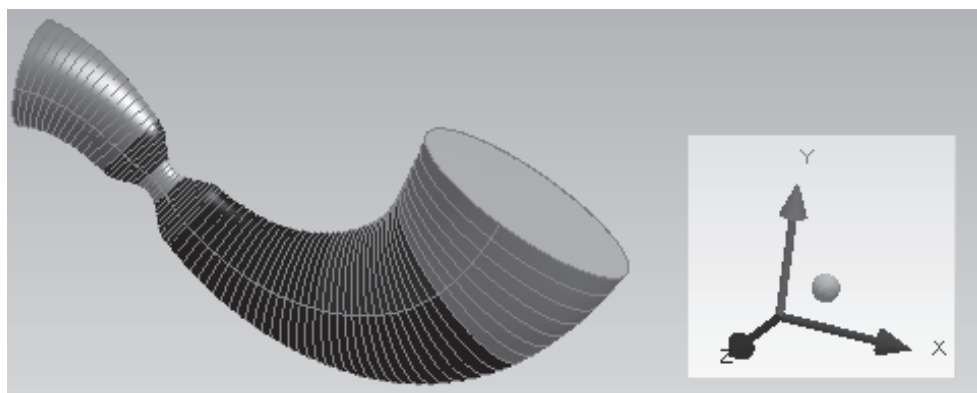


Рис. 1. Построение трехмерной поверхности желудка в *Ansys Design Modeler* (сокращенный сегмент – область пилорического отверстия, сегмент слева от области сокращения – кишечник, справа – антральный отдел желудка)

5. В *Ansys Meshing* построена расчетная сетка из 717953 тетрагональных элементов. Размер ребра поверхностных элемента варьируется от 0,6 мм (в зонах вогнутой части антрального отдела желудка и области вблизи пилорического отверстия) до 1,5 мм (в области выпуклой части антрального отдела желудка).

Распространение волны и взаимодействие с моторикой пилорического сфинктера моделируется на основе известных литературных данных [15, 19] и результатов УЗИ. Через несколько минут после приема пищи в антральном отделе желудка начинают распространяться волны сокращения – сжатие участков (полос) циркулярного слоя мышц по всей окружности желудка. После сокращения участка циркулярных мышц происходит их расслабление, а волна сокращения переходит на другой участок.

Волна антрального сокращения инициируется с эллипса с центром в точке $x = 0,088$ м и продвигается к пилорическому отверстию со скоростью $v = 2,2 \cdot 10^{-3}$ м/с, направленной по касательной к центральной линии, в течение 38 с.

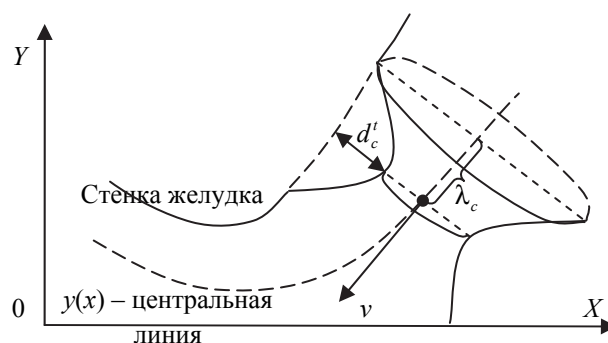


Рис. 2. Параметры волны сокращения в антральном отделе желудка

Значения параметров волны (рис. 2) в базовом сценарии: параметр ширины волны не зависит от времени $\lambda_c = 0,01$ м (половина ширины волны), амплитуда сокращения линейно возрастает в течение первых 12 с до значения 0,011 м ($d_c^t = (t/12) \cdot 0,011$ м), в момент времени $t \in [12, 34]$ с амплитуда остается неизменной, при $t \in [34, 38]$ с линейно уменьшается до 0. Волны инициируются с периодом 18 с. Открытие сфинктера осуществляется при $t \in [26, 28]$ с, закрытие при $t \in [30, 32]$ с (рис. 3).

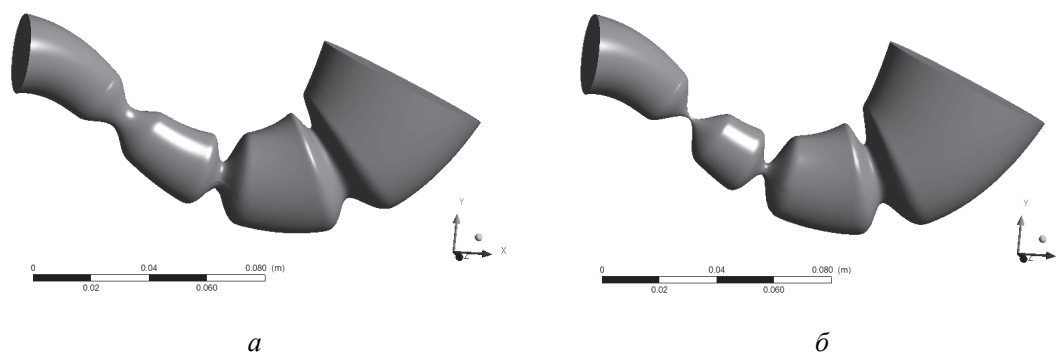


Рис. 3. Положение волн в антральном отделе: *a* – при открытом пилорическом сфинктере; *б* – при закрытом пилорическом сфинктере

Динамическое перепостроение расчетной сетки осуществляется с помощью инструментов *Dynamic Mesh* в решателе *Fluent* с использованием скрипта (*User-Defined Function*), написанного на языке *C*. Скрипт представляет собой программную реализацию трехмерного алгоритма оценки смещения узлов сетки при движении волны антрального сокращения и моторики пилорического сфинктера. Основным этапом алгоритма является определение положения узла в расчетный момент времени через смещение из недеформированного состояния вдоль перпендикуляра к центральной линии с использованием синусоидальной функции:

$$d_{node}^{t+1} = (r_{node} / r_{1node}) \cdot d_c^{t+1} \cdot \left(1 + \sin \left(\pi \cdot \frac{\lambda_c - \rho_c}{2\lambda_c} \right) \right)^2 / 2, \text{ при } \rho_c \leq \lambda_c, \quad (1)$$

где d_{node}^{t+1} – величина смещения, ρ_c – расстояние между центром эллипса и положением центра волны, r_{1node} – большой радиус эллипса в начальной конфигурации, r_{node} – радиус эллипса в начальной конфигурации, соответствующего узлу расчетной сетки. Возведение множителя с синусом в сте-

пень (в данном случае в квадрат) обеспечивает сглаживание в области пика волны.

Таким образом, в рамках модели «мезоуровня» пищеварительной системы разработан алгоритм построения трехмерной формы антродуоденальной области желудочно-кишечного тракта по результатам ультразвуковых исследований. Выполнена оценка изменения конфигурации узлов расчетной сетки при прохождении волны сокращения в антральном отделе и моторной активности пилорического сфинктера. Результаты работы будут использованы для расчета трехмерного течения в антродуоденальной области тракта. Дальнейшее развитие модели «мезоуровня» предполагает учет многофазности течения (частицы пищи/жидкость), процессов секреции пищеварительного сока, всасывания токсических веществ в кровеносную систему, элементы нейроэндокринной регуляции. Кроме того, для достижения поставленных задач необходимо дальнейшее развитие других подмоделей пищеварительной системы, в особенности кишечника, где преобладают процессы всасывания веществ в кровеносную систему. Рассмотренные подходы могут быть использованы для оценки риска здоровью при пероральной экспозиции химических веществ в рамках эволюционного моделирования.

Список литературы

1. Камалтдинов М.Р., Кирьянов Д.А. Применение рекуррентных соотношений для оценки интегрального риска здоровью населения // Здоровье семьи – 21 век. № 3. [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.fh-21.perm.ru/download/2011-3-6.pdf> (дата обращения: 01.02.2013).

2. Кирьянов Д.А., Камалтдинов М.Р. Методика расчета дополнительной заболеваемости и смертности на основе эволюционного моделирования риска здоровью населения // Анализ риска здоровью. – 2014. – № 1. – С. 31–39.
3. Математическая модель эволюции функциональных нарушений в организме человека с учетом внешнесредовых факторов / П.В. Трусов, Н.В. Зайцева, Д.А. Кирьянов, М.Р. Камалтдинов, М.Ю. Цинкер, В.М. Чигвинцев, Д.В. Ланин // Математическая биология и биоинформатика. – 2012. – № 2. – С. 589–610. [Электронный ресурс]. – URL: http://www.matbio.org/2012/Trusov_7_589.pdf (дата обращения: 05.12.2012).
4. Методические подходы к оценке популяционного риска здоровью на основе эволюционных моделей / Н.В. Зайцева, П.З. Шур, Д.А. Кирьянов, М.Р. Камалтдинов, М.Ю. Цинкер // Здоровье населения и среда обитания. – 2013. – № 1 (238). – С. 4–6.
5. Методические подходы к оценке риска воздействия разнородных факторов среды обитания на здоровье населения на основе эволюционных моделей / Н.В. Зайцева, П.В. Трусов, П.З. Шур, Д.А. Кирьянов, В.М. Чигвинцев, М.Ю. Цинкер // Анализ риска здоровью. – 2013. – № 1. – С. 15–23.
6. Самура Б.А., Дралкин А.В. Фармакокинетика. – Харьков: Основа, 1996. – 286 с.
7. Соловьев В.Н., Фирсов А.А., Филов В.А. Фармакокинетика. – М.: Медицина, 1980. – 432 с.
8. Трусов П.В., Зайцева Н.В., Камалтдинов М.Р. Моделирование пищеварительных процессов с учетом функциональных нарушений в организме человека: концептуальная и математическая постановки, структура модели // Российский журнал биомеханики. – 2013. – № 4. – С. 67–83.
9. Analysis of flow phenomena in gastric contents induced by human gastric peristalsis using CFD / H. Kozu, I. Kobayashi, M. Nakajima, K. Uemura, S. Sato, S. Ichikawa // Food Biophysics. – 2010. – Vol. 5. – P. 330–336.
10. Analysis of surface geometry of the human stomach using real-time 3-D ultrasonography in vivo / D. Liao, H. Gregersen, T. Hausken, O.H. Gilja, M. Mundt, G. Kassab // Neurogastroenterol Motil. – 2004. – Vol. 16. – P. 315–324.
11. Barequet G., Shapiro D., Tal A. Multilevel sensitive reconstruction of polyhedral surfaces from parallel slices // The Visual Computer. – 2000. – Vol. 16. – P. 116–133.
12. Dillard S., Krishnan S., Udaykumar H.S. Mechanics of flow and mixing at antroduodenal junction // World J. Gastroenterol. – 2007. – Vol. 13. – P. 1365–1371.
13. Effects of posture on gastric emptying, transpyloric flow, and hunger after a glucose drink in healthy humans / K.L. Jones, D.G. O'Donovan, M. Horowitz, A. Russo, Y. Lei, T. Hausken // Dig. Dis. Sci. – 2006. – Vol. 51. – P. 1331–1338.
14. Ferrua M.J., Singh R.P. Modeling the fluid dynamics in a human stomach to gain insight of food digestion // Journal of food science. – 2010. – Vol. 75. – P. 151–162.
15. Gastric flow and mixing studied using computer simulation / A. Pal, K. Indreshkumar, W. Schwizer, B. Abrahamsson, M. Fried, J.G. Brasseur // Proc. R. Soc. Lond. B. – 2004. – Vol. 271. – P. 2587–2594.
16. Gastric response to increased meal viscosity assessed by echo-planar magnetic resonance imaging in humans / L. Marciani, P.A. Gowland, R.C. Spiller, P. Manoj, J.R. Moore, P. Young, S. Al-Sahab, D. Bush, J. Wright, A.J. Fillery-Travis // The journal of nutrition. – 2000. – Vol. 130. – P. 122–127.
17. Kong F., Singh R.P. Disintegration of solid foods in human stomach // Journal of food science. – 2008. – Vol. 73. – P. 67–80.
18. Lobregt S., Viergever A. A discrete dynamic contour model // IEEE transactions on medical imaging. – 1995. – Vol. 14. – P. 12–24.
19. Pal A., Brasseur J.G., Abrahamsson B. A stomach road or “Magenstrasse” for gastric emptying // Journal of Biomechanics. – 2007. – Vol. 40. – P. 1202–1210.
20. Reconstruction of 3D medical object shapes from 2D cross-sections / A. Nedzvezd, P. Lukashevich, S. Ablameyko, T.M. Deserno, Lehmann // Pattern recognition and information processing: proceedings of the tenth international conference / Editors: V. Krasnoproshin, S. Ablameyko, R. Sadykhov. – 2009. – P. 247–250.
21. Rohling R.N. 3D freehand ultrasound: reconstruction and spatial compounding. PhD Dissertation. – University of Cambridge, 1998. – 158 p.
22. Schulze K. Imaging and modeling of digestion in the stomach and the duodenum // Neurogastroenterol Motil. – 2006. – Vol. 18. – P. 172–183.
23. Scintigraphic validation of a magnetic resonance imaging method to study gastric emptying of a solid meal in human / C. Feinle, P. Kunz, P. Boesiger, M. Fried, W. Schwizer // Gut. – 1999. – Vol. 44. – P. 106–111.
24. Singh S., Singh R.P. Gastric Digestion of Foods: Mathematical Modeling of Flow Field in a Human Stomach // Food Engineering Interfaces. – 2011. – P. 99–117.
25. Treece G.M. Volume measurement and surface visualisation in sequential freehand 3D ultrasound. PhD Dissertation. – University of Cambridge, 2000. – 172 p.
26. Ultrasound-determined geometric and biomechanical properties of the human duodenum / J.B. Frokjaer, S.D. Andersen, A.M. Drewes, H. Gregersen // Dig. Dis. Sci. – 2006. – Vol. 51. – P. 1662–1669.
27. Xue Z., Ferrua M.J., Singh R.P. Computational fluid dynamics modeling of granular flow in human stomach // Alimentos hoy. – 2012. – Vol. 21. – P. 3–14.

References

1. Kamaltdinov M.R., Kir'janov D.A. Primenenie rekurrentnyh sootnoshenij dlja ocenki integral'nogo riska zdorov'ju naselenija [Application of recurrence relations for the evaluation of the integral risk to public health]. *Zdorov'e sem'i - 21 vek*, no. 3. Available at: <http://www.fh-21.perm.ru/download/2011-3-6.pdf>.
2. Kir'janov D.A., Kamaltdinov M.R. Metodika rascheta dopolnitel'noj zaboлеваemosti i smernosti na osnove jevoljucionnogo modelirovanija riska zdorov'ju naselenija [Methods of calculating the additional morbidity and mortality based on evolutionary modeling of health risk]. *Analiz riska zdorov'ju*, 2014, no. 1, pp. 31–39.
3. Trusov P.V., Zajceva N.V., Kir'janov D.A., Kamaltdinov M.R., Cinker M.Ju., Chigvincev V.M., Lanin D.V. Matematicheskaja model' jevoljucii funkcional'nyh narushenij v organizme cheloveka s uchedom vneshnesredovyh faktorov [Mathematical model of the evolution of functional disorders in the human body, taking into account environmental factors]. *Matematicheskaja biologija i bioinformatika*, 2012, no. 2, pp. 589–610. Available at: http://www.matbio.org/2012/Trusov_7_589.pdf.
4. Zajceva N.V., Shur P.Z., Kir'janov D.A., Kamaltdinov M.R., Cinker M.Ju. Metodicheskie podhody k ocenke populjacionnogo riska zdorov'ju na osnove jevoljucionnyh modelej [Methodological approaches to the assessment of public health risk on the basis of evolutionary models]. *Zdorov'e naselenija i sreda obitanija*, 2013, no. 1 (238), pp. 4–6.
5. Zajceva N.V., Trusov P.V., Shur P.Z., Kir'janov D.A., Chigvincev V.M., Cinker M.Ju. Metodicheskie podhody k ocenke riska vozdejstvija raznorodnyh faktorov sredy obitanija na zdorov'e naselenija na osnove jevoljucionnyh modelej [Methodological approaches to assessing the risk of exposure to diverse environmental factors on human health based on evolutionary models]. *Analiz riska zdorov'ju*, 2013, no. 1, pp. 15–23.
6. Samura B.A., Dralkin A.V. Farmakokinetika [Pharmacokinetics]. Kharkiv: "Osnova", 1996. 286 p.
7. Solov'ev V.H., Firsov A.A., Filov V.A. Farmakokinetika [Pharmacokinetics]. Moscow: Medicina, 1980. 432 p.
8. Trusov P.V., Zajceva N.V., Kamaltdinov M.R. Modelirovanie pishhevaritel'nyh processov s uchedom funkcional'nyh narushenij v organizme cheloveka: konceptual'naja i matematicheskaja postanovki, struktura modeli [Modeling digestive processes taking into account functional disorders in the human body: conceptual and mathematical formulations, structure of the model]. *Rossijskij zhurnal biomehaniki*, 2013, no. 4, pp. 67–83.
9. Kozu H., Kobayashi I., Nakajima M., Uemura K., Sato S., Ichikawa S. Analysis of flow phenomena in gastric contents induced by human gastric peristalsis using CFD. *Food Biophysics*, 2010, vol. 5, pp. 330–336.
10. Liao D., Gregersen H., Hausken T., Gilja O.H., Mundt M., Kassab G. Analysis of surface geometry of the human stomach using real-time 3D ultrasonography in vivo. *Neurogastroenterol Motil*, 2004, vol. 16, pp. 315–324.
11. Barequet G., Shapiro D., Tal A. Multilevel sensitive reconstruction of polyhedral surfaces from parallel slices. *The Visual Computer*, 2000, vol. 16, pp. 116–133.
12. Dillard S., Krishnan S., Udaykumar H.S. Mechanics of flow and mixing at antroduodenal junction. *World J Gastroenterol*, 2007, vol. 1, pp. 1365–1371.
13. Jones K.L., O'Donovan D.G., Horowitz M., Russo A., Lei Y., Hausken T. Effects of posture on gastric emptying, transpyloric flow, and hunger after a glucose drink in healthy humans. *Dig Dis Sci*, 2006, vol. 51, pp. 1331–1338.
14. Ferrua M.J., Singh R.P. Modeling the fluid dynamics in a human stomach to gain insight of food digestion. *Journal of food science*, 2010, vol. 75, pp. 151–162.
15. Pal A., Indreshkumar K., Schwizer W., Abrahamsson B., Fried M., Brasseur J. G. Gastric flow and mixing studied using computer simulation. *Proc. R. Soc. Lond. B*, 2004, vol. 271, pp. 2587–2594.
16. Marciani L., Gowland P.A., Spiller R.C., Manoj P., Moore J.R., Young P., Al-Sahab S., Bush D., Wright J., Fillery-Travis A.J. Gastric response to increased meal viscosity assessed by echo-planar magnetic resonance imaging in humans. *The journal of nutrition*, 2000, vol. 130, pp. 122–127.
17. Kong F., Singh R.P. Disintegration of solid foods in human stomach. *Journal of food science*, 2008, vol. 73, pp. 67–80.
18. Lobregt S., Viergever A. A discrete dynamic contour model. *IEEE transactions on medical imaging*, 1995, vol. 14, pp. 12–24.
19. Pal A., Brasseur J. G., Abrahamsson B. A stomach road or “Magenstrasse” for gastric emptying. *Journal of Biomechanics*, 2007, vol. 40, pp. 1202–1210.
20. Nedzvezd A., Lukashevich P., Ablameyko S., Deserno T. M., Lehmann. Reconstruction of 3D medical object shapes from 2D cross-sections. *Pattern recognition and information processing: proceedings of the tenth international conference*. Editors: Krasnoprosin V., Ablameyko S., Sadykhov R. 2009, pp. 247–250.
21. Rohling R.N. 3D freehand ultrasound: reconstruction and spatial compounding. PhD Dissertation. University of Cambridge, 1998. 158 p.
22. Schulze K. Imaging and modeling of digestion in the stomach and the duodenum. *Neurogastroenterol Motil*, 2006, vol. 18, pp. 172–183.

23. Feinle C., Kunz P., Boesiger P., Fried M., Schwizer W. Scintigraphic validation of a magnetic resonance imaging method to study gastric emptying of a solid meal in human. *Gut*, 1999, vol. 44, pp. 106–111.
24. Singh S., Singh R.P. Gastric Digestion of Foods: Mathematical Modeling of Flow Field in a Human Stomach. *Food Engineering Interfaces*, 2011, pp. 99–117.
25. Treece G.M. Volume measurement and surface visualisation in sequential freehand 3D ultrasound. PhD Dissertation. University of Cambridge, 2000. 172 p.
26. Frokjaer J.B., Andersen S.D., Drewes A.M., Gregersen H. Ultrasound-determined geometric and biomechanical properties of the human duodenum. *Dig. Dis. Sci*, 2006, vol. 51, pp. 1662–1669.
27. Xue Z., Ferrua M.J., R. P. Singh. Computational fluid dynamics modeling of granular flow in human stomach. *Alimentos hoy*, 2012, vol. 21, pp. 3–14.

3D MODELING OF ANTRODUODENAL ZONE MOTILITY OF DIGESTIVE TRACK FOR THE PURPOSE OF HEALTH RISKS EVALUATION WITH PERORAL EXPOSITION TO CHEMICALS*

M.R. Kamaltdinov

Federal Budget Scientific Institution “Federal Scientific Center for Medical and Preventive Health Risk Management Technologies”, Russian Federation, Perm, 82 Monastyrskaya St., 614045
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “Perm State National Research Polytechnic University”, Russian Federation, Perm, 29 Komsomolsky av., 614990

As a part of multi-level model of accumulation of functional disorders in the human body under the influence of environmental factors, the sub-model of “meso-level” of digestive system is being developed. The article highlights the tasks of reconstruction of 3D model of antroduodenal area of the gastrointestinal tract and evaluation of nodes dislocation of the computational grid at the passing of peristaltic wave in gastric antrum and pyloric sphincter motor activity. The observed approaches could be applied in health risk assessment at peroral exposure to chemicals.

Key words: mathematical modeling, digestive system, stomach, evolution of functional disorders, peristaltic waves.