

Диффузионно-взвешенная магнитно-резонансная томография в диагностике дегенерации межпозвонкового диска

Аннотация

Диффузионно-взвешенная магнитно-резонансная томография (ДВ МРТ) представляет собой метод магнитно-резонансной томографии, который позволяет получать изображения биологических тканей, взвешенных по диффузии молекул воды на клеточном уровне. Установлено, что для ранних стадий дегенерации межпозвонкового диска характерно изменение степени диффузии молекул воды. Дегидратация клеточных популяций межпозвонкового диска, связанная с резким ограничением диффузии внутри- и внеклеточной воды, находит свое отражение в виде повышенного сигнала на ДВ МРТ. Таким образом, ДВ МРТ служит одним из ведущих методов диагностики начальных проявлений дегенерации межпозвонкового диска, который позволяет определить возможные показания к проведению нейрохирургических вмешательств.

Позвоночный столб человека обладает уникальными структурными и физиологическими характеристиками, которые позволяют удерживать, стабилизировать и перемещать наше тело в пространстве в течение всей жизни [1], [2]. Нарушение правильного функционирования структур позвоночника, как правило, наблюдается при травме или дегенеративно-дистрофическом процессе и зачастую клинически проявляется в виде болевого синдрома и ранней утраты трудоспособности [3], [4]. Несмотря на активное развитие методов инструментальной диагностики, по-прежнему остается открытым вопрос в отношении анатомо-физиологических предпосылок к развитию начальных патологических изменений структур позвоночного столба. Именно этот вопрос долгое время являлся барьером на пути к разработке эффективных методов лечения данной группы пациентов. Благодаря технологиям, позволяющим изучить анатомо-физиологические предпосылки, которые лежат в основе развития заболеваний позвоночника, появилась возможность взглянуть по-новому на старую проблему.

Бесспорно, T1- и T2-взвешенные изображения МРТ позволяют обнаружить изменения в структурах позвоночного столба с высокой степенью точности, а также обладают высокой чувствительностью к обнаружению патологических процессов [5]. Тем не менее зачастую трудно отличить МР-сигнал, имеющий физиологический характер, и те МР-сигналы, которые являются признаками тканевых патологических изменений, особенно у пациентов с заболеваниями и травмами позвоночника. Основная причина заключается в том, что различия во внутренних физиологических процессах между тканями не всегда визуализируются при рутинных протоколах МРТ-исследований [6], [7]. Например, компрессионные переломы тел позвонков будут иметь сходные характеристики на T1- и T2-взвешенных изображениях, но при этом в одних случаях происхождение переломов будет связано с системным остеопорозом, а в других – с метастатическим поражением [8].

Современные достижения медицинской науки позволили модифицировать методы МРТ, что делает возможным определение анатомо-физиологических предпосылок в развитии патологических изменений позвоночного столба и дегенерации межпозвонкового диска в частности. Одним из таких современных методов диагностики является ДВ МРТ. Данная технология способна точно определить степень диффузии и активность движения молекул воды внутри клеток и во внеклеточном пространстве, тем самым визуализировать нормальную и дегенеративно-измененную ткани [9], [10]. Изначально метод ДВ МРТ активно использовался в диагностике ранних признаков ишемических поражений головного мозга, но уже к настоящему моменту ДВ МРТ зарекомендовала себя как один из ведущих методов диагностики заболеваний органов средостения, брюшной полости и малого таза [11]. Относительно новым направлением является изучение патологических процессов в межпозвонковых дисках и позвоночном столбе в целом с помощью ДВ МРТ [12].

Цель данного литературного обзора – анализ современных литературных данных об эффективности клинического и на-

учно-исследовательского применения метода ДВ МРТ в диагностике дегенеративных изменений в межпозвонковом диске. Использование комплексного подхода в диагностике ранних признаков дегенерации межпозвонкового диска позволит глубже понять данную тематику и разработать новые эффективные методы терапии данного патологического процесса.

Значение диффузии молекул воды в клинических исследованиях

Диффузия является ключевым физиологическим процессом, который представляет собой движение ряда веществ, в том числе кислорода и углекислого газа, внутри клетки и во внеклеточном пространстве. Процессы диффузии способствуют нормальной жизнедеятельности всех тканевых структур организма путем поступления кислорода, питательных веществ и элиминации продуктов метаболизма [13]. Величина диффузии в значительной степени зависит от уровня градиента между двумя средами. Такого рода градиенты, как правило, возникают из-за разницы концентраций молекул воды, белков и электролитов. Процессы диффузии также зависят от количества и плотности тканевых барьеров – цитоплазматических мембран, коллагеновых волокон, молекул гликозаминогликана и т. п. [14]. Позвоночный столб состоит из различных тканевых барьеров, таких как коллагеновые волокна, цитоплазматические мембраны и кровеносные сосуды, между которыми существует значительный градиент диффузии молекул воды [15]. Например, адипоциты подкожной жировой клетчатки расположены плотно друг к другу и содержат малое количество свободной воды; это означает, что данная ткань обладает низкой степенью диффузии. Спинно-мозговая жидкость, напротив, содержит значительное количество свободной воды и минимум тканевых барьеров для движений молекул, что в итоге и определяет высокую диффузионную способность ликвора [16]. Стоит отметить, что существенные изменения в диффузионной способности тканей могут быть следствием воздействия многочисленных неблагоприятных факторов, среди которых доминирующими являются травма и различные дегенеративные заболевания. ДВ МРТ, оценивая диффузионную способность тканей, помогает описать их структурно-функциональное состояние и природу данного явления.

Основные принципы ДВ МРТ

ДВ МРТ представляет собой метод магнитно-резонансной томографии, позволяющий получать изображения биологических тканей, взвешенные по диффузии молекул воды на клеточном уровне [17]. Основной принцип работы ДВ МРТ заключается в визуализации и измерении активного движения молекул в ткани. Интенсивность сигнала при ДВ МРТ полностью зависит от диффузионной способности в вокселе (трехмерный пиксел) исследуемого объекта: чем выше степень диффузии молекул воды, тем интенсивнее сигнал на ДВ-изображении [18]. Существуют два вида движения молекул воды. Под термином «изотропная диффузия воды» принято понимать относительно неограниченное движение молекул воды во всех

направлениях. Если диффузия ограничена в одном или нескольких направлениях, то такой тип движения молекул воды принято называть анизотропным. Движение молекул воды происходит внутри клетки, во внеклеточном пространстве, а также трансмембранным путем. В живом организме диффузия воды является не случайным процессом, а имеет строгую закономерность, так как все ткани структурированы. Цитоплазматические мембраны, волокна соединительной ткани, а также аксоны нервных клеток ограничивают свободное движение молекул воды и тем самым разделяют живую ткань на отсеки. С другой стороны, немаловажную роль в диффузии играет физико-химическое взаимодействие молекул воды и макромолекул [19].

Контрастность ДВ-изображения находится в строгой зависимости от степени ограничения свободной диффузии молекул воды. К примеру, движение молекул воды в сером веществе головного мозга практически изотропное, но при этом диффузия молекул воды в белом веществе анизотропна, что связано с компактным расположением большого числа проводящих путей [20]. Патологические процессы, которые приводят к изменению проницаемости цитоплазматических мембран, способны опосредованно вызывать изменения диффузии молекул воды. Такие изменения отчетливо визуализируются при ДВ МРТ с подсчетом коэффициента диффузии (КД) [21]. Доказано, что во внутриклеточном пространстве движение молекул воды ограничено больше, нежели во внеклеточном, вследствие наличия большого количества микробарьеров (ядерные мембраны, клеточные органеллы). При воздействии патологического процесса на живую ткань происходит изменение соотношения внутри- и внеклеточной жидкости в пользу последней и, как следствие, ограничение движения молекул воды. Уменьшение диффузии воды также наблюдается при повышении вязкости среды при высоком содержании белка.

Изначально ДВ МРТ использовали только в диагностике нейрососудистых заболеваний головного мозга. Тем не менее практически сходные патологические процессы, наблюдаемые при нарушении мозгового кровообращения и дегенеративных заболеваниях позвоночника, позволили использовать данный метод диагностики и в спинальной нейрохирургии [22]. Такие явления, как ишемия и гипоксемия ткани, приводят к деполяризации цитоплазматических мембран клеток, изменению мембранной проницаемости, нарушению ионного обмена и направленного поступления молекул воды. Клеточный отек приводит к сдавлению внеклеточного пространства и, возможно, к нарушению диффузии внутриклеточной воды вследствие изменения органелл. Указанные клеточные процессы находят свое отражение на ДВ-изображениях в виде повышенного МР-сигнала и низкого значения КД. Клеточный лизис, сморщивание и последующее разрежение ткани приводят к резкому увеличению внеклеточного пространства и уровня свободной воды с одновременным снижением интенсивности сигнала на ДВ МРТ и повышением КД.

Каждый воксель ДВ-изображения имеет интенсивность, которая отражает степень свободы диффузии молекул воды данной локализации. Пользуясь терминологией шкалы относительности, это означает, что ткань с анизотропным движением молекул воды будет выглядеть более яркой, а ткань с изотропной диффузией – менее яркой [23]. Но при этом при построении карт диффузии будет получено обратное отражение: низкий КД отражает более ограниченную степень диффузии. Таким образом, наилучшие результаты достигаются при исследовании тканей с преимущественно изотропной диффузией (например, серое вещество головного мозга).

Сверхбыстрые технологии получения изображений (single short echo planar pulse, SS EPI) позволили значимо улучшить временное разрешение ДВ МРТ. Образно выражаясь, такие технологии позволяют «заморозить» движение [24]. Активное движение молекул воды в пределах клетки быстро перекрывается произвольными и непроизвольными движениями пациента, пульсацией сосудов и ликвора. Небольшой вклад диффузии в дефазировку протонов не виден на SS EPI-изображе-

ниях и легко перекрывается T2-эффектами [24]. Важно помнить, что диффузия – это временной процесс, а значит МР-последовательность должна занимать определенное время для наблюдения последнего. Поэтому приходится манипулировать достаточно длинными временами эхо, что приводит к использованию T2-EPI-последовательностей. Области высокого сигнала сохраняют яркость на ДВ-изображениях, тем самым симулируя ограничение процесса диффузии. Этот феномен именуется как эффект T2-свечения. Картирование КД лишено данного недостатка, поэтому предельно важным при выявлении ограниченной диффузии является именно значение КД [25].

ДВ МРТ в диагностике дегенерации межпозвонкового диска

Межпозвонковый диск как бессосудистая структура поддерживает свою жизнедеятельность только благодаря процессам диффузии питательных веществ и удаления продуктов метаболизма. В течение всей жизни человеческого организма межпозвонковый диск подвергается дегенеративным процессам, что характеризуется дегидратацией пульпозного ядра и фиброзного кольца [26]. Клинически указанные процессы проявляются в виде болевого синдрома. Но при этом до сих пор остаются неясными механизмы развития боли. И лишь последние исследования с использованием ДВ МРТ, направленные на изучение диффузии в нормальном и дегенерирующем дисках, позволили по-новому взглянуть на данную проблему.

Antoniou с соавторами в своем исследовании на трупных дисках доказали, что снижение КД пульпозного ядра связано со снижением количества внеклеточного матрикса [27]. В то же время Beattie с соавторами при изучении диска *in vivo* продемонстрировали, что в дегенерирующем диске имеет место прямая зависимость между пониженной интенсивностью T2-сигнала и снижением значения КД [28]. Данные исследования подтверждают тот факт, что дегенерирующий диск обладает малой диффузионной способностью. Причины снижения диффузии веществ через ткань диска до конца неясны. Но с большой долей вероятности можно предполагать, что отчасти это связано с увеличением плотности фиброзной ткани диска. Такого рода изменения гистоархитектоники диска создают множественные микробарьеры на пути движения жидкости, что в дальнейшем приводит к дистрофии и уменьшению синтеза протеогликана межпозвонкового диска [28].

В процессе жизнедеятельности межпозвонковый диск подвергается многочисленным морфологическим и биохимическим перестройкам [29]. Как указывалось ранее, межпозвонковый диск – это практически бессосудистая структура, где незначительная популяция клеток окружена огромной массой межклеточного вещества. Фиброзное кольцо диска большей частью представлено коллагеновыми волокнами, основная же составляющая пульпозного ядра – это протеогликан. Именно снижение уровня синтеза протеогликана является индуцирующим фактором дегенерации межпозвонкового диска [29], [30]. Замещение протеогликана на плотную волокнистую соединительную ткань резко ограничивает процессы диффузии питательных веществ и молекул воды. Считается, что эти процессы являются ключевыми в развитии дегенерации диска [30]. ДВ МРТ позволяет визуализировать указанные явления в диске на самых ранних стадиях [31]. Значения КД непосредственно отражают микроокружение диффундирующих молекул воды внутри клетки и во внеклеточном пространстве. Так, КД при дегидратации и снижении уровня синтеза протеогликана в пульпозном ядре имеет минимальное значение. Многие исследования доказывают, что снижение КД говорит о нарушении целостности структуры межпозвонкового диска [32]. Следовательно, измерение КД при ДВ МРТ позволяет верифицировать дегенеративные процессы диска на ранних этапах развития, когда последние еще не определяются по данным T2-взвешенных рутинных методик. На *рис. 1* представлена МРТ-картина дегенеративно-измененного межпозвонкового диска в различных режимах (T1-, T2- и DW-режимы).

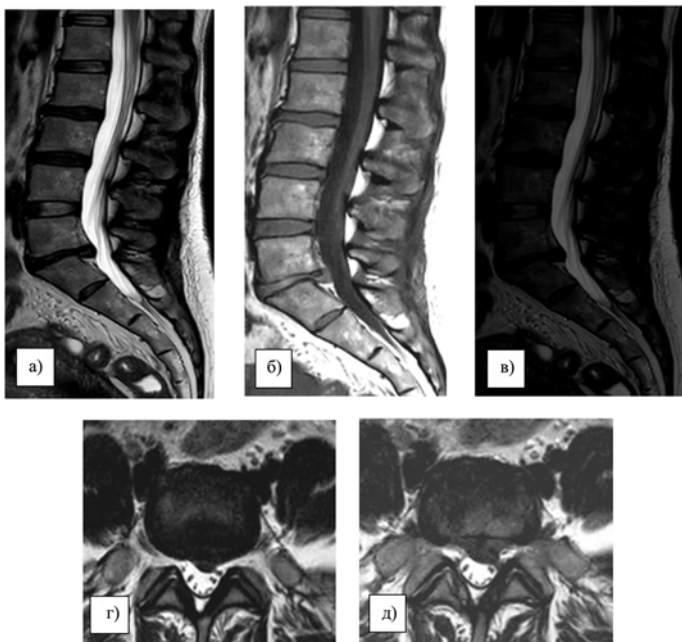


Рис. 1. МРТ пояснично-крестцового отдела позвоночника: а) сагиттальная МР-томограмма, Т2-режим; б) сагиттальная МР-томограмма, Т1-режим; в) сагиттальная МР-томограмма, режим DW MRI; г) аксиальная МР-томограмма, Т2-режим; д) аксиальная МР-томограмма, режим DW MRI

Заключение

На сегодняшний день ДВ МРТ представляет собой современный метод инструментальной диагностики многих заболеваний позвоночного столба, в частности дегенеративных процессов межпозвоночного диска. Возможность неинвазивной оценки *in vivo* таких важнейших физиологических процессов, как диффузия молекул воды, позволит углубить понимание молекулярных механизмов дегенерации диска. Тем не менее для широкого использования метода ДВ МРТ в клинической практике необходимо решить несколько проблем, касающихся самой методики проведения исследования. Общеизвестно, что качество ДВ-изображения зависит от движений исследуемого объекта: чем больше пациент совершает произвольных и непроизвольных движений, тем ниже качество изображения, потому особое внимание нужно обращать на минимизацию движений, совершаемых пациентом. Высокая стоимость данного метода исследования и ограниченная доступность также не позволяют внедрить его в широкую клиническую практику. С другой стороны, непрекращающиеся разработки новых технологий, в том числе и режим быстрого сканирования ДВ-изображений, позволили значительно сократить время исследования пациента, снизить себестоимость обследования и сделать доступным ДВ МРТ для большего числа пациентов. Таким образом, метод ДВ МРТ в ближайшем будущем прочно займет место ведущего инструментального метода диагностики дегенеративных процессов позвоночного столба в целом и межпозвоночного диска в частности. Способность визуализировать основные патофизиологические процессы, играющие ключевую роль в патогенезе дегенерации диска, позволит расширить область знаний о патогенезе данного состояния и на основе этого разработать новейшие методы биологической терапии.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 15-15-30037).

Список литературы:

1. Бывальцев В.А., Степанов И.А., Бельх Е.Г., Гуерс М., Прул М. Цитокиновые механизмы дегенерации межпозвоночного диска // Сибирский медицинский журнал. 2015. № 5. С. 17-21.

2. Bogduk N., Twomey L.T. Clinical Anatomy of the Lumbar Spine. – New York, NY: Churchill-Livingstone, 1987.
3. Boyd L.M., Carter A.J. Injectable biomaterials and vertebral endplate treatment for repair and regeneration of the intervertebral disc // Eur. Spine J. 2006. Vol. 15. Suppl. 3. PP. 414-421.
4. Freemont A.J., Peacock T.E., Goupille P., Hoyland J.A., O'Brien J., Jayson M.I. Nerve ingrowth into diseased intervertebral disc in chronic back pain // Lancet. 1997. Vol. 350. PP. 178-181.
5. Cousins J.P., Haughton V.M. Magnetic resonance imaging of the spine // J. Am. Acad. Orthop. Surg. 2009. Vol. 17. PP. 22-30.
6. Карельская Н.А., Кармазановский Г.Г. Диффузионно-взвешенная магнитно-резонансная томография всего тела // Хирургия. Журнал им. Н.И. Пирогова. 2010. № 8. С. 57-60.
7. Корниенко В.Н., Пронин И.Н. Диагностическая нейрорадиология. – М.: Медицина, 2006. 1327 с.
8. Abdel Razeq A.A., Kandeel A.Y., Soliman N. et al. Role of diffusion-weighted echo-planar MR imaging in differentiation of residual or recurrent head and neck tumors and posttreatment changes // Am. J. Neuroradiol. 2007. Vol. 28. PP. 1146-1152.
9. Baur A., Reiser M.F. Diffusion-weighted imaging of the musculoskeletal system in humans // Skeletal Radiol. 2000. Vol. 29. PP. 555-562.
10. Сергеев Н.И., Котляров П.М., Солодкий В.А. Диффузионно-взвешенные изображения в диагностике метастатического поражения позвоночника и костей таза // Сибирский онкологический журнал. 2012. № 6 (54). С. 68-72.
11. Jensen M.C., Brant-Zawadzki M.N., Obuchowski N., Modic M.T., Malkasian D., Ross J.S. Magnetic resonance imaging of the lumbar spine in people without back pain // N. Engl. J. Med. 1994. Vol. 331. PP. 69-73.
12. Baur A., Dietrich O., Reiser M. Diffusion-weighted imaging of the spinal column // Neuroimaging. Clin. N. Am. 2002. Vol. 12. PP. 147-160.
13. Kealey S.M., Aho T., Delong D., Barboriak D.P., Provenzale J.M., Eastwood J.D. Assessment of apparent diffusion coefficient in normal and degenerated intervertebral lumbar disks: Initial experience // Radiology. 2005. Vol. 235. PP. 569-574.
14. Adams M.A., Roughley P.J. What is intervertebral disc degeneration, and what causes it? // Spine. 2006. Vol. 31. PP. 2151-2161.
15. Belykh E., Giers M., Bardanova L., Theodore N., Preul M., Byvaltsev V. The Role of Bone Morphogenetic Proteins 2, 7, and 14 in Approaches for Intervertebral Disk Restoration // World Neurosurg. 2015. Vol. 84 (4). PP. 870-877.
16. Boos N., Weissbach S., Rohrbach H., Weiler C., Spratt K.F., Nerlich A.G. Classification of age-related changes in lumbar intervertebral discs // Spine. 2012. Vol. 27 (23). PP. 2631-2644.
17. Brisby H. Pathology and possible mechanisms of nervous system response to disc degeneration // J. Bone Joint Surg. Am. 2006. Vol. 88. Suppl. 2. PP. 68-71.
18. Ferguson S.J., Ito K., Nolte L.P. Fluid flow and convective transport of solutes within the intervertebral disc // J. Biomech. 2004. Vol. 37. PP. 213-221.
19. Buirski G., Silberstein M. The symptomatic lumbar disc in patients with low-back pain. Magnetic resonance imaging appearances in both a symptomatic and control population // Spine. 1993. Vol. 18. PP. 1808-1811.
20. Chiu E.J., Newitt D.C., Segal M.R., Hu S.S., Lotz J.C., Majumdar S. Magnetic resonance imaging measurement of relaxation and water diffusion in the human lumbar intervertebral disc under compression in vitro // Spine. 2001. Vol. 26. PP. 437-444.
21. Colagrande S., Belli G., Politi L.S., Mannelli L., Pasquinelli F., Villari N. The influence of diffusion- and relaxation-related factors on signal intensity: An introductory guide to magnetic resonance diffusion-weighted imaging studies // J. Comput. Assist. Tomogr. 2008. Vol. 32. PP. 463-474.

22. Colagrande S., Carbone S.F., Carusi L.M., Cova M., Villari N. Magnetic resonance diffusion-weighted imaging: Extraneurological applications // Radiol. Med. 2006. Vol. 111. PP. 392-419.
23. Dietrich O., Biffar A., Baur-Melnyk A., Reiser M.F. Technical aspects of MR diffusion imaging of the body // Eur. J. Radiol. 2010. Vol. 76. PP. 314-322.
24. Elliott J., Pedler A., Beattie P., McMahon K. Diffusion-weighted magnetic resonance imaging for the healthy cervical multifidus: A potential method for studying neck muscle physiology following spinal trauma // J. Orthop. Sports Phys. Ther. 2010. Vol. 40. PP. 722-728.
25. Haughton V. Medical imaging of intervertebral disc degeneration: Current status of imaging // Spine. 2004. Vol. 29. PP. 2751-2756.
26. Heemskerk A.M., Strijkers G.J., Drost M.R., van Bochove G.S., Nicolay K. Skeletal muscle degeneration and regeneration after femoral artery ligation in mice: Monitoring with diffusion MR imaging // Radiology. 2007. Vol. 243. PP. 413-421.
27. Antoniou J., Demers C.N., Beaudoin G., et al. Apparent diffusion coefficient of intervertebral discs related to matrix composition and integrity // Magn. Reson. Imaging. 2004. Vol. 22. PP. 963-972.
28. Beattie P.F., Donley J.W., Arnot C.F., Miller R. The change in the diffusion of water in normal and degenerative lumbar intervertebral discs following joint mobilization compared to prone lying // J. Orthop. Sports. Phys. Ther. 2009. Vol. 39. PP. 4-11.
29. Kerttula L., Kurunlahti M., Jauhiainen J., Koivula A., Oikarinen J., Tervonen O. Apparent diffusion coefficients and T2 relaxation time measurements to evaluate disc degeneration. A quantitative MR study of young patients with previous vertebral fracture // Acta Radiol. 2001. Vol. 42. PP. 585-591.
30. Koltzenburg M., Yousry T. Magnetic resonance imaging of skeletal muscle // Curr. Opin. Neurol. 2007. Vol. 20. PP. 595-599.
31. Urban J.P., Winlove C.P. Pathophysiology of the intervertebral disc and the challenges for MRI // J. Magn. Reson. Imaging. 2007. Vol. 25 (2). PP. 419-432.
32. Humzah M.D., Soames R.W. Human intervertebral disc: Structure and function // Anat. Rec. 1988. Vol. 220. PP. 337-356.

Вадим Анатольевич Бывальцев,
д-р мед. наук, профессор, ведущий научный сотрудник,
Иркутский научный центр хирургии
и травматологии,
зав. курсом нейрохирургии,
Иркутский государственный
медицинский университет,
гл. нейрохирург, ОАО «РЖД»,
руководитель центра нейрохирургии
НУЗ «Дорожная клиническая больница»
ст. Иркутск-Пассажирский ОАО «РЖД»,
Иван Андреевич Степанов,
аспирант курса нейрохирургии,
Иркутский государственный
медицинский университет,
Андрей Андреевич Калинин,
канд. мед. наук, мл. научный сотрудник,
Иркутский научный центр хирургии
и травматологии,
ассистент курса нейрохирургии,
Иркутский государственный
медицинский университет,
врач-нейрохирург центра нейрохирургии
НУЗ «Дорожная клиническая больница»
ст. Иркутск-Пассажирский ОАО «РЖД»,
Константин Викторович Шашков,
канд. мед. наук, врач-рентгенолог,
Консультативно-диагностический центр,
г. Иркутск,
e-mail: byval75vadim@yandex.ru

А.Н. Виноградов, Е.В. Матвеев, Е.Н. Белов, Л.Н. Юсупов

Моделирование и оптимизация перистальтических пьезонасосов для автоматической инфузии

Аннотация

В статье рассмотрено построение многослойных двумерных моделей пьезонасосов перистальтического типа. Приведены результаты оптимизации геометрических и физических параметров двухслойной модели. Получены условия создания бегущей волны деформаций. Дано сравнение результатов моделирования пьезонасоса по аналитической методике и по методу конечных элементов. Полученные результаты обеспечивают повышение производительности и энергоэффективности при проведении инфузионной терапии.

Введение

Основными парентеральными методами введения лекарственных препаратов в жидком виде являются гравитационная инфузия (капельницы), инфузия под давлением (шприцы) и автоматизированная инфузия с помощью насосов – помповых, шприцевых и перистальтических, например роликовых [1].

Известными проблемами современной инфузионной терапии являются повышение точности, плавности и непрерывности дозирования лекарственных средств, а также повышение портативности и надежности устройств для автоматизированной инфузии в сложных условиях, например в невесомости.

Преодолеть подобные трудности способны перистальтические бесклапанные насосы. Достоинством таких насосов является возможность прокачки вязких и чувствительных к перемешиванию жидкостей. Однако известные конструкции мик-

ронасосов, например [2]-[5], построенные на базе соединения каналами мембранных пьезонасосов или использующие эффект Вентури с элементами диффузор-сопло [6], работают дискретно, в силу чего не могут обеспечить необходимой равномерности прокачки.

Наиболее перспективными являются линейные перистальтические микронасосы с пьезоприводами, создающими деформации изгиба стенок камеры.

Схемы таких пьезонасосов представлены на *рис. 1*. Они содержат систему изгибающихся пластин с пьезоэлементами, локально изменяющими объем канала или трубки с рабочей жидкостью. Электронный блок 4 «Б.У.» управляет величиной и фазой напряжения на пьезоэлементах. При этом создается бегущая волна деформаций, энергия которой передается движению прокачиваемой жидкости. Форма волны (на *рис. 1* показана пунктиром) и рабочий объем зависят от напряжения на каждом пьезоэлементе. Производительность микронасоса оп-