

ВЛИЯНИЕ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ХАРАКТЕРА ДВИЖЕНИЯ ЛИКВОРА НА ПАТОЛОГИИ ПОЗВОНОЧНИКА

© 2024 г. А.Г. Зверев*, Ю.Н. Токарев*,#

*Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН,
Большая Тульская ул., 52, Москва, 115191, Россия

#E-mail: ytokarev@ya.ru

Поступила в редакцию 19.01.2023 г.

После доработки 19.01.2023 г.

Принята к публикации 01.02.2023 г.

*«До тех пор, пока МОЗГ не будет в достаточном количестве
поставлять ликвор, организм будет больным».*

Э.Т. Стилл

На основе динамического параметра расхода спинномозговой жидкости приводится оригинальная формула оценки патологии позвоночно-двигательных сегментов позвоночника. Приведены графики, которые наглядно показывают изменение патологии от глубины травматизации. Полученные данные будут полезны специалистам по компьютерной и магнитно-резонансной томографии, в настоящее время упрощенно описывающим саму патологию.

Ключевые слова: позвоночно-двигательный сегмент, расход, глубина травматизации.

DOI: 10.31857/S0006302924010194, EDN: QUNVAX

Патологии (дисфункции) позвоночника в классическом понимании делятся на сколиозы и различные виды деформаций, главные из которых костные дефекты, протрузии, грыжи. Также существуют редкие неврологические расстройства: мильформация Киари, серингомеолия и т.п., которые в работе и рассматриваются. Эти патологии сопровождаются изменениями анатомического положения позвонка или группы позвонков, которые определяются как дисфункции позвоночно-двигательных сегментов и делятся на физиологические и нефизиологические (травматические). Наличие самой патологии влияет либо на ограничение движения, либо на возникновение болей. Более сложные случаи являются либо дисфункцией Вебстера, грубой травмой, родовой травмой, либо вытекают из вышеприведенного. На основании того же понимания и по снимкам компьютерной и магнитно-резонансной томографии ставится диагноз дорзопатия (остеохондроз) или его вариант с дополнительным описанием протрузий, сколиозов, грыж и т.п. При большей квалификации невролога (вертебролога) диагноз может быть связан с патологией отдельного органа. Эта статистическая информация не

объясняет, почему снижается работоспособность, слабеют мышцы и внутренние органы, происходит потеря гибкости. Наша работа показывает, что эти изменения происходят в первую очередь из-за изменения динамических параметров: давления и расхода спинномозговой жидкости (СМЖ) в зоне дисфункции спинальной полости и, как следствие, в микроспинальной полости спинномозгового нерва. Они влияют на снижение проводимости и общей работоспособности спинномозговых нервов, которых питает СМЖ и выводит из них отработанные продукты жизнедеятельности [1–3].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При неправильном трехмерном анатомическом положении позвонка (диагностируемая дисфункция) происходит вдавливание позвоночного кольца в твердую мозговую оболочку спинного мозга. При этом на наружном радиусе спинальной полости будет образовываться рубец (локальное сжатие), который располагается микровыступом внутри полости. Здесь дисфункция аппроксимируется микровыступом, размеры которого необходимо взять из снимков компью-

Сокращения: СМЖ – спинномозговая жидкость.

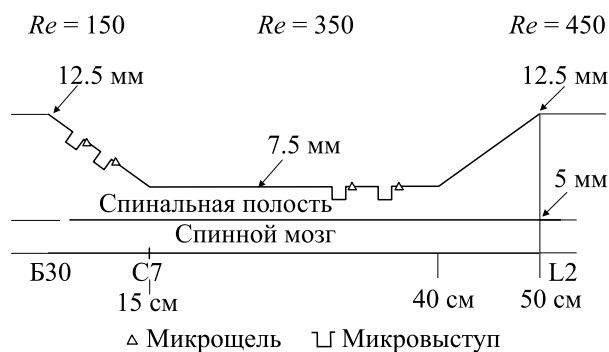


Рис. 1. Схема спинной полости с вариантами дисфункции, в зону микрошлестки выходит соответствующий спинно-мозговой нерв.

терной и магнитно-резонансной томографии (рис. 1).

Ниже этого дефекта в твердой мозговой оболочке спинного мозга расположены микрошлестки, куда выходят спинномозговые нервы (рис. 2).

По конструкции спинномозговой нерв является аналогом кольцевой трубы (микроспинальной полостью) между твердой мозговой и наружной (эпиневрием) оболочками нерва. Внутри микроспинальной полости нерва также пульсирует СМЖ [7], поскольку спинная и микроспинальная полости едины. В зоне дисфункции происходит двухсторонний синхронный процесс. С одной стороны, из-за механического ограничения движения сегментарно в локальном объеме нарушаются тонусно-силовые характеристики [4]. Это приводит к снижению потребности соответствующего спинномозгового нерва в необходимом количестве СМЖ. С другой стороны, дис-

функция локально приводит к скручиванию твердой мозговой оболочки (локальному стенозу) по сечению. Это приведет к уменьшению площади сечения микроспинальной полости на переходе спинная полость/микроспинальная полость, что вызовет увеличение необходимой силы, т.е. внутричерепное давление для прокачивания объема СМЖ без патологии, вдоль нерва для ее всасывания в оболочку нерва. В итоге дисфункция уменьшает суммарный объем спинной и микроспинальной полостей, т.е. общий объем спинномозговой жидкости в них [1, 11], тем самым уменьшая общий расход. Кроме этого, за дисфункцией возникают зоны пониженного давления [6], что также приводит к снижению всасывания СМЖ паутинными грануляциями [12, 13] в оболочки спинномозгового нерва. Таким образом, через периневральные щели СМЖ будет меньше всасываться в нерв, что со временем приведет к его деградации. Эта гидродинамика СМЖ

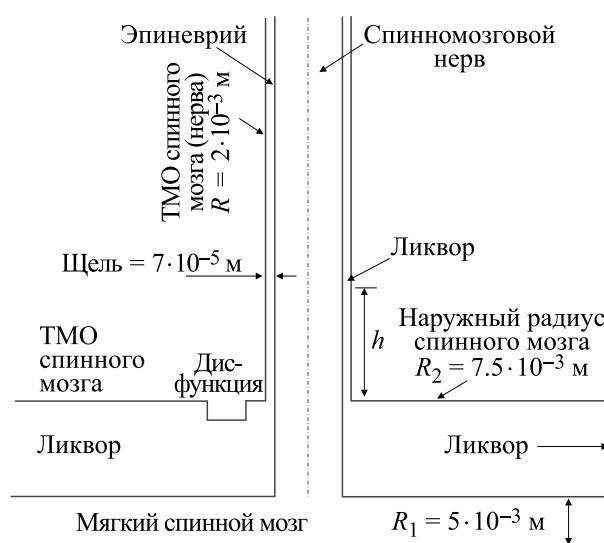


Рис. 2. Схема микроспинальной полости с вариантом дисфункции. ТМО — твердая мозговая оболочка.

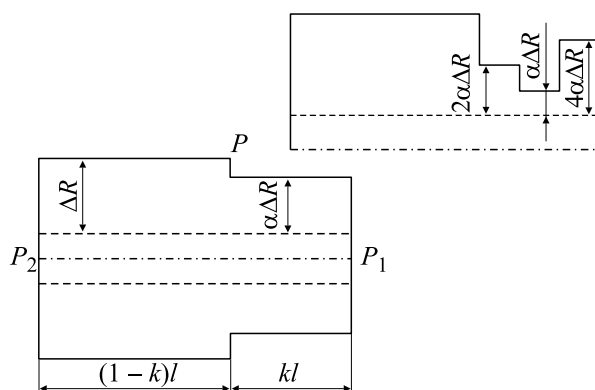


Рис. 3. Суммирование одинаковых дисфункций на правой стороне схемы спинальной полости.

будет снижать потребность нерва в ней, ослабляя силу центральной нервной системы, тонус мускулатуры и работоспособность внутренних органов.

В работе [7] была получена удобная приближенная формула расчета расхода Q нестационарного течения СМЖ внутри спинальной полости:

$$Q_{\max} = \frac{3}{4} \pi \frac{R_2^2 \cdot R_2^2 \cdot \Delta P \cdot \left(1 - \frac{R_1}{R_2}\right)^3}{\rho \cdot v \cdot \sqrt{9 + 4\pi^2 \cdot \alpha^4}}.$$

С учетом замен

$$\rho \cdot A = \Delta P, U_p^2 = A \cdot R_2, U_v = \frac{v}{R_2},$$

$$\tilde{A} = \frac{3}{4} \pi \frac{1}{\rho \cdot v \cdot \sqrt{9 + 4\pi^2 \cdot \alpha^4}}$$

имеем

$$Q = \tilde{A} \cdot R \cdot \Delta R^3 \cdot \frac{\Delta P}{l}.$$

для участка длиной l .

Используя закон Ома для гидродинамической проводимости и условия непрерывности [1], приведем схему сдвига всех патологий на правую сторону и ее варианта с разной глубиной травматизации (рис. 3), где $0 \leq k, \alpha \leq 1, \alpha = \tilde{\alpha}, k$ — общая длина патологии спинальной полости, $\tilde{\alpha} \times \Delta R$ — доля глубины травматизации за счет дисфункции позвонков.

Тогда

$$Q_1 = \tilde{A} \cdot R \cdot \Delta R^3 \cdot \frac{P_2 - P}{(1-k)l},$$

$$Q_2 = \tilde{A} \cdot R \cdot \Delta R^3 \cdot \tilde{\alpha}^3 \frac{P - P_1}{kl}.$$

В силу непрерывности потока

$$Q_1 = Q_2$$

и на границе перепада радиуса зазора за счет дисфункции

$$\begin{aligned} \tilde{A} \cdot R \cdot \Delta R^3 \cdot \frac{P_2 - P}{(1-k)l} &= \tilde{A} \cdot R \cdot \Delta R^3 \cdot \tilde{\alpha}^3 \frac{P - P_1}{kl} \rightarrow (P_2 - P)k = (P - P_1)\tilde{\alpha}^3(1-k) \rightarrow \\ &\rightarrow P = \frac{P_2 k + \tilde{\alpha}^3(1-k)P_1}{k + \tilde{\alpha}^3(1-k)}. \end{aligned}$$

Тогда соотношение норма Q_1 /патологии Q будет равно

$$\frac{Q_1}{Q} = \frac{P_2 - P}{(1-k)l} \frac{\tilde{A} \cdot R \cdot \Delta R^3}{\tilde{A} \cdot R \cdot \Delta R^3} \frac{l}{P_2 - P_1} = \frac{P_2 - \frac{kP_2 + \tilde{\alpha}^3(1-k)P_1}{k + \tilde{\alpha}^3(1-k)}}{(1-k)(P_2 - P_1)} = \frac{kP_2 + \tilde{\alpha}^3(1-k)(P_2 - P_1) - kP_2}{(1-k)(k + \tilde{\alpha}^3(1-k))(P_2 - P_1)} = \frac{\tilde{\alpha}^3}{k + \tilde{\alpha}^3(1-k)}.$$

Эта формула показывает потери ликвора (СМЖ), что позволяет легко понять сложную гидродинамику процесса. В результате преобразований, перепада давления и сжатия пери-

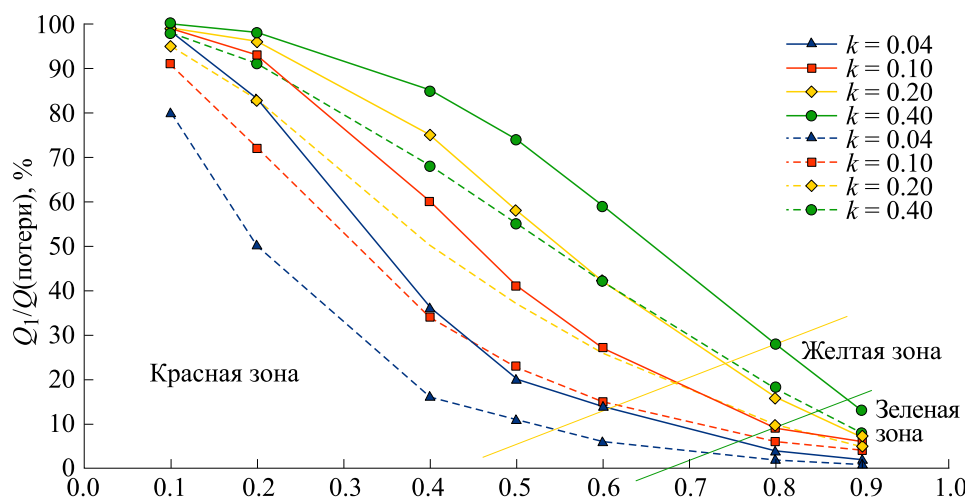


Рис. 4. Потери ликвора от глубины травматизации (в %).

невралных шелей за счет дисфункции потери СМЖ приведут к медленной деградации спинномозгового нерва, а не за счет его псевдоущемления дисфункцией [8]. Для разных дисфункций коэффициент k необходимо пересчитывать (рис. 3, справа), для него k меняем на $k' = (73/192)k$, исходя из сопротивления участка длины l , равного

$$\left(\frac{kl}{\tilde{A} \cdot R \cdot \Delta R^3 \tilde{\alpha}^3} \right).$$

Пусть для дисфункции двух позвонков $k = 0.04$ (4%), для пяти позвонков $k = 0.10$ (10%), для десяти позвонков $k = 0.20$ (20%), для двадцати позвонков $k = 0.40$ (40%).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Смещение крутизны графиков в сторону меньшей глубины травматизации для нестационарного течения по отношению к стационарному течению показывает резкое снижение возможностей, при которых еще вероятна физиологическая дисфункция. По форме графиков можно предположить, что потери до 15% организм еще может компенсировать. Эти потери происходят за счет как физиологической, так и нефизиологической дисфункции f , т.е. зеленая и желтая зоны. Но с увеличением угла наклона потери начинают резко возрастать для всех видов поражений от $k = 0.04$ – 0.40 . На рис. 4 дисфункции пяти позвонков стационарного течения уже соответствуют дисфункциям двух позвонков нестационарного течения.

При нестационарном течении дисфункции пяти позвонков соответствуют дисфункциям десяти позвонков стационарного течения и т.д. вплоть до дисфункций десяти позвонков, соответствующих дисфункциям двадцати позвонков с

резким возрастанием глубины дисфункции по параметру.

Фактически наличие дисфункции двух позвонков соответствующего поражения меняет физиологическую дисфункцию на нефизиологическую, поэтому травматические дисфункции выходят на первый план, что в реальной жизни мы и наблюдаем. Достаточно одной крупной дисфункции, чтобы произошло локальное ограничение движения (наклонов и поворотов), без учета постепенного снижения общей работоспособности, меньшей выработки СМЖ мозгом, снижения функций внутренних органов, потери максимальной силы в стандартных тестах. Позвоночник человека теряет общую гибкость, а вместе с ней и силу в виде снижения собственного объема движений, человек скован, испытывает небольшие хронические боли, приводящие к асимметрии тела (анатомически), которые не дают полноценно жить и работать. Полученные результаты сделаны с определенной долей точности, с ориентиром на изменение крутизны графиков и глубины дисфункции, которые с увеличением патологии локально будут уменьшать амплитуду движения. Возможно, что потери расхода СМЖ более 25% с глубиной поражения более 50% анатомически могут быть предельны, а далее идет разрушение позвонка или разрыв его связок. Тем не менее модель показывает, что при любом наборе дисфункций все графики попадают в красную зону, где травматизация будет ощущаться острой болью, глубоким спазмом, отсутствием подвижности вообще и ступором биомеханики тела. Кроме этого, хорошо видно влияние глубины поражений на потери ликвора. Такие графики могут показывать триединство мира:

Таблица 1. Результаты зависимости потери ликвора от глубины травматизации для нестационарного течения, с

учетом приближенной формулы [7], где $\frac{Q_1}{Q} = \frac{\tilde{\alpha}^3}{k + \tilde{\alpha}^3(1-k)}$

Процентное отношение глубины травматизации $\tilde{\alpha}$, отн. ед.	Дисфункция двух позвонков		Дисфункция пяти позвонков		Дисфункция десяти позвонков		Дисфункция двадцати позвонков	
	Отношение нормы к патологии, отн. ед.	Потери ликвора Q_1/Q , %	Отношение нормы к патологии, отн. ед.	Потери ликвора Q_1/Q , %	Отношение нормы к патологии, отн. ед.	Потери ликвора Q_1/Q , %	Отношение нормы к патологии, отн. ед.	Потери ликвора Q_1/Q , %
0.9 (10%)	0.98	2	0.94	6	0.93	7	0.87	13
0.8 (20%)	0.96	4	0.91	9	0.84	16	0.72	28
0.6 (40%)	0.86	14	0.73	27	0.58	42	0.41	59
0.5 (50%)	0.80	20	0.59	41	0.42	58	0.26	74
0.4 (60%)	0.64	36	0.40	60	0.25	75	0.15	85
0.2 (80%)	0.17	83	0.07	93	0.04	96	0.02	98
0.1 (90%)	0.02	98	0.01	99	0.01	99	0.002	~100

земля — начало зеленой зоны, где происходит зарождение жизни (энергия + жидкость), затем зеленая, желтая и начало красной зоны соответствуют человеку, а далее небо — красная зона, где ликвор начинает стремиться к нулю — смерть (—энергия и жидкость). Каждый график является линией судьбы отдельного человека с патологией от единиц до десятков дисфункций. Таким образом, нефизиологические (травматические) дисфункции являются главными повреждениями позвоночника. К ним относятся травмы внутриутробного развития, родовые, травмы в течение жизни и глубокие психоэмоциональные. Резкое снижение потребности в полном объеме ликвора в спинальной полости ведет к уменьшению его производства в головном мозгу. Это влечет спад общей работоспособности, так как ликвор не в полной мере выполняет дренажную функцию, т.е. отвод продуктов жизнедеятельности из головного мозга и позвоночника. Это приведет к замедлению движений, запускающих старение тела, которое в первую очередь связано с нарушением биомеханики черепа, позвоночника и крестца, т.е. структур управления производства ликвора, кровотоком, а не возрастным старением. Такая механика управляется изменением динамических параметров: функциональной связью скорости, давления и расхода, артериальной, венозной крови и СМЖ [9, 10]. Кроме этого, начальное снижение когнитивных способностей в интервале 40–50 лет также связано с меньшей вы-

работкой ликвора в целом [9], хотя после 50 лет и происходит их восстановление, но за счет уменьшения мозга. Тем не менее те, кто в этот период не практиковал активную умственную деятельность, будут испытывать трудности в ее стабилизации. Общая схема варианта старения выглядит так: наличие дисфункции в позвоночнике → снижение производства ликвора → уменьшение двигательной активности → уменьшение крови, поступающей в головной мозг, или усиление кровотока для улучшения питания головного мозга с возможным увеличением внутричерепного давления → снижение когнитивных способностей → старение. Понятно, что могут быть и два других варианта: нарушение биомеханики черепа и крестца и хронически запущенные патологии головного мозга и тела в виде классических заболеваний. Эти варианты в работе не рассматриваются, так как расчеты сделаны для широко распространенных патологий позвоночника (дисфункции позвоночно-двигательных сегментов) без сочетанных хронических заболеваний.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Двигательные патологии позвоночника резко нарушают интегральную биомеханику человека. Они изменяют общие стандарты движения человека как в любой профессии, так и в спорте. Даже наличие нескольких дисфункций резко меняет биомеханику позвоночника в виде ограничения в

привычных движениях, необходимых для полноценной жизни. Это особенно важно в пожилом возрасте, когда неустраненные дисфункции приводят к хроническим обострениям, сокращая продуктивную жизнь человека. Важно выявить эти патологии на ранних стадиях, используя техники остеопатии, компьютерной и магнитно-резонансной томографии и другую высокотехнологичную аппаратуру, чтобы эффективно их лечить, восстанавливая сложную биомеханику тела. Объяснение этих патологий на основе гидродинамических параметров и биомеханики тела будет способствовать более правильной постановке диагноза. Кроме этого, приведенные расчеты расширяют понимание патологии позвоночника, объясняя снижение двигательных параметров тела (сила, гибкость, работоспособность).

В современном мире в связи с быстрым развитием IT-технологий и искусственного интеллекта создаются электромеханические протезы, позволяющие также восстанавливать утраченные движения. Параллельно с использованием 3D-принтера продвигаются технологии ремонта любого органа (ткани) биомеханики тела. Это было смоделировано в американском фильме «Суррогаты» 2009 года, когда люди, потеряв физические кондиции, только живут в квартирах, а их искусственные тела (роботы) создают иллюзию благополучия, работая вместо них в городе. Этот путь развития тоже допустим, так как позволяет инвалидам улучшить качество жизни, но он более затратен. В конце концов, как всегда, процедура состязания здорового человека и человека с частично искусственной биомеханикой выявит победителя. При одинаковых затратах здоровый человек без искусственной биомеханики побеждает, таким образом тема работы имеет приоритет. Правда, стоит отметить, что разработанные электромеханические манипуляторы для рук и ног (экзоскелеты) позволяют иметь преимущества перед обычным человеком, но для ограниченного объема движений. Тем не менее они пока не могут создать конкуренцию обычной технике от ручных инструментов до подъемных кранов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Выражаем искреннее признание преподавателям РВШОМ по остеопатии и сотрудникам ИБРАЭ РАН д-ру физ.-мат. наук В.М. Головизнину и канд. физ.-мат. наук В.Г. Кондакову.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Настоящая работа не содержит описания собственных исследований с использованием людей и животных в качестве объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зверев А. Г. *Роль ликвородинамики в физиологии человека* (дипломная работа) (Русская высшая школа остеопатической медицины, М., 2015).
2. Решетиллов В. И. Отток ликвора из подболочного пространства. *Вопр. нейрохирургии*, № 6, 44–46 (1982).
3. Bert R. J., Settippalle N., Tiwana E., Muddasani D., Nath R., Wellman B., Mihlon F., Negahdar M., Amini A., and Boakye M. The relationships among spinal CSF flows, spinal cord geometry, and vascular correlations: evidence of intrathecal sources and sinks. *Am. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol.*, **317** (3), R470–R484 (2019). DOI: 10.1152/ajpregu.00101.2018
4. Васильева Л. Ф. *Мануальная диагностика и терапия* (Фолиант, СПб., 2001).
5. Солодков А. С. и Сологуб Е. Б. *Физиология спортивной деятельности* (СПб., 1999).
6. Armaly B. F., Durst F., Pereira J. C. F., and Schöning B. Experimental and theoretical investigation of backward-facing step flow. *J. Fluid Mechanics*, **127**, 473–496 (1983). DOI: 10.1017/S00222112083002839
7. Зверев А. Г. и Токарев Ю. Н. Неинвазивный подход в гидродинамике СМЖ в спинальной полости. *Биофизика*, **67** (1), 150–159 (2022).
8. Жарков П. Л., Жарков А. П. и Бубновский С. М. «Поясничные» боли. *Диагностика, причины, лечение* (М., 2001).
9. Москаленко Ю. Е., Вайнштейн Г. Б., Рябчикова Н. А., Хальворсон П., Кравченко Т. И. и Варди Т. Функциональное единство систем внутричерепной гемолитородинамики, биомеханических свойств черепа и когнитивной деятельности мозга. *Региональное кровообращение и микроциркуляция*, **9** (3), 43–46 (2010).
10. Alperin N., Mazda M., Lichter T., and Lee H. S. From Cerebrospinal Fluid Pulsation to Noninvasive Intracranial Compliance and Pressure Measured by MRI Flow Studies. *Curr. Med. Imaging*, **2** (1) (2006). DOI: 10.2174/157340506775541622
11. Bechter K. and Schmitz B. Cerebrospinal fluid outflow along lumbar nerves and possible relevance for pain research: case report and review. *Croat. Med. J.*, **55** (4), 399–404 (2014). DOI: 10.3325/cmj.2014.55.399
12. Chen L., Elias G., Yostos M. P., Stimec B., Fasel J., and Murphy K. Pathways of cerebrospinal fluid outflow: a deeper understanding of resorption. *Neuroradiology*, **57** (2), 139–147 (2015). DOI: 10.1007/s00234-014-1461-9
13. Wright B. L., Lai J. T., and Sinclair A. J. Cerebrospinal fluid and lumbar puncture: a practical review. *J. Neurol.*, **259** (8), 1530–1545 (2012). DOI: 10.1007/s00415-012-6413-x

Effects of the Pulsating Flow of Cerebrospinal Fluid on Spinal Pathologies**A.G. Zverev* and Yu.N. Tokarev***

**Institute for Problems of Safe Development of Nuclear Energy, Russian Academy of Sciences,
Bolshaya Tuskaya ul. 52, Moscow, 115191 Russia*

Based on cerebrospinal fluid flow dynamic parameters, an original formula for assessing pathology of the spinal motion segments of the vertebra is given. In this paper, graphs are used to clearly show changes in pathology depending on the depth of trauma. The data collected can be useful for computed tomography and magnetic resonance imaging technicians, who still describe pathology in a simple way.

Keywords: spinal motion segment, flow rate, depth of trauma