4. Juskys, R. Anatomical variations of superior sagittal sinus and tributary bridging veins: a cadaveric study / R. Juskys, S. Rocka, A. Suchomlinov // Cureus. – 2022. – Vol. 14, № 2. – P. e21979.
5. Cerebral venous thrombosis: imaging patterns / I. M. Oliveira, J. Á. Duarte, M. Dalaqua [et al.] // Radiol Bras. – 2022. – Vol. 55, № 1. – P. 54-61.

ПРЕДПОСЫЛКИ ТРОМБООБРАЗОВАНИЯ В ВЕНОЗНЫХ СИНУСАХ ТВЁРДОЙ МОЗГОВОЙ ОБОЛОЧКИ КРОЛИКА

Малахова К. А., Шмарловский Ю. Р., Ксенофонтова В. А.

Белорусский государственный медицинский университет
Минск, Республика Беларусь

Актуальность. Кролик широко используется в экспериментальной нейробиологии как животная модель для воспроизведения сосудистых патологий головного мозга человека [1], однако корректная интерпретация результатов экспериментов требует четкого понимания гемодинамических параметров данных структур. Тромбоз венозных синусов твёрдой мозговой оболочки является редкой, но потенциально жизнеугрожающей патологией, исход которой во многом определяется локализацией тромбоза и индивидуальными особенностями венозной гемодинамики. Количественная характеристика распределения скорости, вязкости и давления крови в синусах твёрдой мозговой оболочки кролика, а также построение конечно-элементной модели на основе реальных морфометрических данных синусов кролика даёт возможность неинвазивно выявить зоны гемодинамического риска и создать базу для оценки применимости кролика как экспериментальной модели при изучении церебрального венозного тромбоза у человека [2].

Цель. Выявить гемодинамические предпосылки тромбообразования в венозных синусах твёрдой мозговой оболочки кролика.

Методы исследования. Материалом исследования стали венозные синусы твердой мозговой оболочки кроликов: дорсальный сагиттальный, прямой, поперечные, сигмовидные синусы; сток синусов и вена Галена. Для визуализации венозного русла в заднюю верхнечелюстную вену вводился самотвердеющий краситель, состоящий из натрий-фосфатного буфера, водного раствора черного пигмента и желатина. Череп вскрывался по линии, проходящей несколько выше затылочных мыщелков, по верхней трети наружного слухового прохода и наружному затылочному выступу. Линейные размеры синусов измерялись при помощи окулярной линейки на световом микроскопе МБС-1. На основе полученных морфометрических данных в программе «COMSOL Multiphysics» была построена трёхмерная геометрическая модель. Моделирование проводилось в

Репозиторий БГМУ

рамках стационарной задачи течения крови как неньютоновской жидкости по модели Карро (вязкость 0,0035-0,056 Па·с, плотность 1050 кг/м³). Анализ данных производился в программе «STATISTICA 10.0» с использованием методов описательной статистики, коэффициента ранговой корреляции Спирмена и множественной линейной регрессии.

Результаты и их обсуждение. По результатам исследования, наиболее выраженные предпосылки к тромбообразованию выявлены в зоне перехода дорсального сагиттального синуса в сток синусов. В этом участке зафиксированы одновременно минимальная скорость кровотока (0,144±0,006 см/с), что связано с малым перепадом давления в синусе, и максимальная вязкость крови (0,056 Па·с). Визуализация линий тока в данной области выявила формирование зон рециркуляции и локального турбулентного движения крови. Сочетание стаза, гипервязкости и дезорганизации ламинарного потока создаёт условия, при которых вероятность адгезии тромбоцитов к эндотелию и инициации коагуляции существенно возрастает.

Объемный расход крови на выходе из дорсального сагиттального синуса составляет 0,0378±0,0052 мл/мин. При этом аналогичный параметр для прямого синуса – 4,20±0,11 мл/мин, что составляет 99,1% объема оттекающей от головного мозга крови. Подобное распределение объёмного расхода крови подчёркивает особую клиническую значимость тромбоза прямого синуса: поскольку дорсальный сагиттальный синус обеспечивает лишь 0,9% суммарного венозного оттока, он не способен компенсировать нарушение проходимости прямого синуса. Следствием этого является то, что окклюзия прямого синуса с высокой вероятностью приведёт к критическому нарушению церебрального венозного оттока. Напротив, тромбоз дорсального сагиттального синуса, несмотря на наличие локальных гемодинамических предпосылок, может иметь менее выраженные гемодинамические последствия ввиду его минимального вклада в суммарный отток.

В сигмовидном синусе картина иная: максимальная скорость кровотока (13,5±0,16 см/с) и минимальная вязкость (стремящаяся к 0,0035 Па·с) свидетельствуют о выраженном защитном антитромботическом эффекте высокой скорости кровотока. Вместе с тем наибольшее давление на стенку сосуда выявлено в нисходящей части сигмовидного синуса (5,22±0,07 Па), что обусловлено его S-образной геометрией с резким изменением направления кровотока. Хроническое механическое воздействие на эндотелий может являться предпосылкой к его повреждению – компоненту триады Вирхова.

Статистический анализ подтвердил, что ширина синусов является основным детерминантом гемодинамических условий тромбогенеза: выявлены значимые корреляции между диаметром синусов и скоростью кровотока ($r = (-0,984) – (-0,999)$; $p<0,001-0,02$). Значимой корреляции ($p>0,05$) между максимальной вязкостью крови и шириной синусов не выявлено, что может свидетельствовать о преобладании роли формы синусов в определении данного параметра.

Репозиторий ГрГМУ

Выводы.

1. Наиболее выраженные предпосылки к тромбообразованию выявлены в зоне перехода дорсального сагиттального синуса в сток синусов: там регистрируется минимальная скорость кровотока (0,144±0,006 см/с) и максимальная вязкость крови (0,056 Па·с.).

2. Прямой синус обеспечивает 99,1% суммарного венозного оттока от головного мозга кролика, вследствие чего его тромбоз представляет наибольшую клиническую угрозу, поскольку дорсальный сагиттальный синус обеспечивает лишь 0,9% суммарного венозного оттока и не способен полностью компенсировать нарушение проходимости прямого синуса.

3. Сигмовидный синус характеризуется максимальной скоростью кровотока (13,5±0,16 см/с) и минимальной вязкостью крови (≈0,0035 Па·с), что обеспечивает выраженный антитромботический эффект; однако S-образная геометрия синуса обусловливает наибольшее пристеночное давление (5,22±0,07 Па), создавая предпосылки к повреждению эндотелия.

4. Выявленная корреляция между диаметром венозных синусов и скоростью кровотока ($r = (-0,984)-(-0,999)$, $p<0,001$) и отсутствие значимой корреляции между шириной и вязкостью крови указывают на преобладающую роль формы синуса в определении вязкостных характеристик потока.

ЛИТЕРАТУРА

1. Labjáková, A. Neurosurgical approaches to the brain of the domestic rabbit / A. Labjáková, V. Páral, I. Pračková // Research in Veterinary Science. – 2025. – Vol. 193. – P. 105771.

2. Personalized computational fluid dynamics analysis of cerebral venous hemodynamics in a case of deep cerebral vein thrombosis / A. M. Assefa, L. Palaiodimou, G. Bourantas, A. Sakellarios // J Pers Med. – 2025. – Vol. 15, № 12. – P. 570.

ОСОБЕННОСТИ КРОВОТОКА В ВЕНОЗНЫХ СИНУСАХ ТВЁРДОЙ МОЗГОВОЙ ОБОЛОЧКИ ВЗРОСЛОГО ЧЕЛОВЕКА

Малахова К. А., Корнетенко В. А., Мансуров В. А.

Белорусский государственный медицинский университет
Минск, Республика Беларусь

Актуальность. Венозный отток от головного мозга имеет решающее значение для сохранения стабильного внутричерепного давления и постоянства церебральной перфузии. Большую значимость имеют индивидуальные особенности анатомии венозных синусов, поскольку они определяют направления

Репозиторий ГрГМУ