

Е.Ю. Справцев

ОСОБЕННОСТИ КРОВОТОКА В ВЕНАХ НИЖНЕЙ КОНЕЧНОСТИ

Научные руководители: канд. техн. наук, доц. В.А. Мансуров,

д-р мед. наук, проф. Н.А. Трушель

Кафедра нормальной анатомии,

Кафедра медицинской и биологической физики

Белорусский государственный медицинский университет, г. Минск

E.Y. Spravtsev

FEATURES OF BLOOD FLOW IN LOWER LIMB VEINS

Tutors: PhD, associate professor V.A. Mansurov,

DM, professor N.A. Trushel

Department of Human anatomy,

Department of Medical and Biological Physics

Belarusian State Medical University, Minsk

Резюме. Проблема флеботромбоза становится одной из самых актуальных в медицине. Методом математического моделирования изучили кровоток и его особенности в области клапана вен нижней конечности. Исходя из этих особенностей кровотока в глубоких венах нижних конечностей, выявили гидродинамические предпосылки формирования венозной патологии у взрослого человека.

Ключевые слова: венозный клапан, математическое моделирование, кровоток.

Resume. The problem of phlebothrombosis is becoming one of the most urgent in medicine. By mathematical modelling, the blood flow and its peculiarities in the lower extremity vein area were studied. Based on these features of blood flow in the deep veins of the lower extremities, the hydrodynamic prerequisites of formation of venous pathology in an adult were identified.

Keywords: venous valve, mathematical modeling, blood flow.

Актуальность. На сегодняшний момент проблема флеботромбоза становится одной из самых актуальных в медицине. Вены нижних конечностей имеют клапаны, которые способствуют движению крови в центростремительном направлении, препятствуя обратному ее току. В норме венозные клапаны сдерживают гидростатическое давление столба крови и препятствуют перерастяжению вен. Однако, если этого не происходит, возникают флеботромбозы нижней конечности. [1].

Цель: методом математического моделирования изучить кровоток в области клапана вен нижней конечности и выявить предпосылки возникновения флеботромбоза.

Задачи:

1. Посредством вычислительной гидродинамики смоделировать движение крови в венах нижней конечности.
2. Выявить морфологические предпосылки возникновения тромбоза.

Материалы и методы. Для изучения механизма движения крови в области венозного полулунного клапана нижней конечности была разработана геометрическая модель венозного клапана в 2D приближении на основе реального образца по данным литературы. Кровоток вокруг венозного клапана исследовался

посредством математического моделирования нестационарного течения при взаимодействии крови и упруго-деформируемой створки венозного клапана. Кровь считается ньютоновской жидкостью с вязкостью равной 5 мПа·с, уравнения движения численно интегрируются методом конечных разностей с использованием движущейся сетки для ламинарного режима течения. Стенка вены считается линейным упругим материалом, механические свойства створок клапана представляются гиперэластичным материалом.

Результаты и их обсуждение. Вычислительная гидродинамика (Computational Fluid Dynamics, CFD) является практическим, адекватным и надежным инструментом для исследования движения крови через венозную систему [2]. Результаты моделирования могут использоваться в практических целях: протезирование вен, конструкция клапана. В настоящей работе кровоток вокруг венозного клапана исследовался посредством численного моделирования взаимодействия крови и упруго-деформируемой створки венозного клапана с использованием метода взаимодействия жидкости и упругого тела (Fluid-structure interaction, FSI).

Геометрия венозного клапана в 2D приближении была разработана на основе реального образца по данным литературы. Кровь считается ньютоновской жидкостью с вязкостью 5 мПа·с, уравнения движения численно интегрируются методом конечных разностей для ламинарного режима течения. Стенка вены считается линейным упругим материалом. Благодаря высокой гибкости створок клапана их механические свойства представляются как гиперэластичный материал. [3].

Поскольку периодический приток крови к вене есть результат активности мышц и последовательного раскрытия и закрытия клапанов, скорость движения крови на входе клапана описывается полупериодом синусоидальной функции, зависящей от времени:

$$V_{in} = V_0 \sin \frac{\pi t}{T} \quad (1),$$

здесь $V_0 = 10$ см/с, T – период.

Эта функция представляет собой корреляцию скорости кровотока в результате последовательного открытия и закрытия ряда клапанов.

Исследовалась зависимость открытия створок от времени до $t=6$ с. В начале, при $t=0$ кровь покоилась, и клапан был закрыт (рис. 2). По мере увеличения скорости на входе (уравнение 1) кровоток оказывал давление на стенки вены и створки клапана, что приводило к упругой деформации, вызывая открытие клапана и движение крови (рис. 3). Через некоторое время, в результате увеличения скорости, увеличивается раскрытие клапана и образовывается вихрь в результате максимального открытия клапана (рис. 4). Через $t=3$ с в результате уменьшения расхода крови скорость открытия клапана уменьшается и клапан возвращается в исходное положение (рис. 5).

В результате нашего исследования была создана геометрия численной модели (синий цвет отображает жидкость, черный цвет – упругие стенки вены и створки клапана).

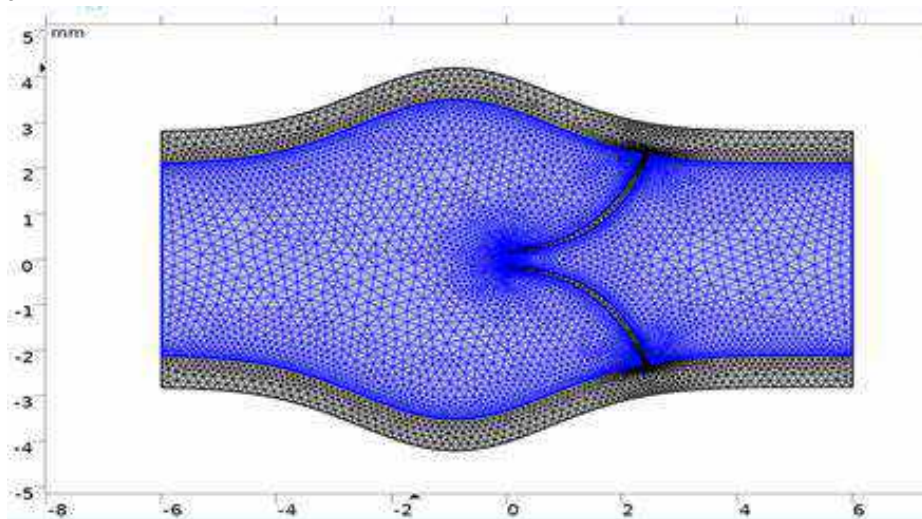


Рис. 1 – Геометрия численной модели (синий цвет – жидкость, черный цвет – упругие стенки вены и створки клапана)

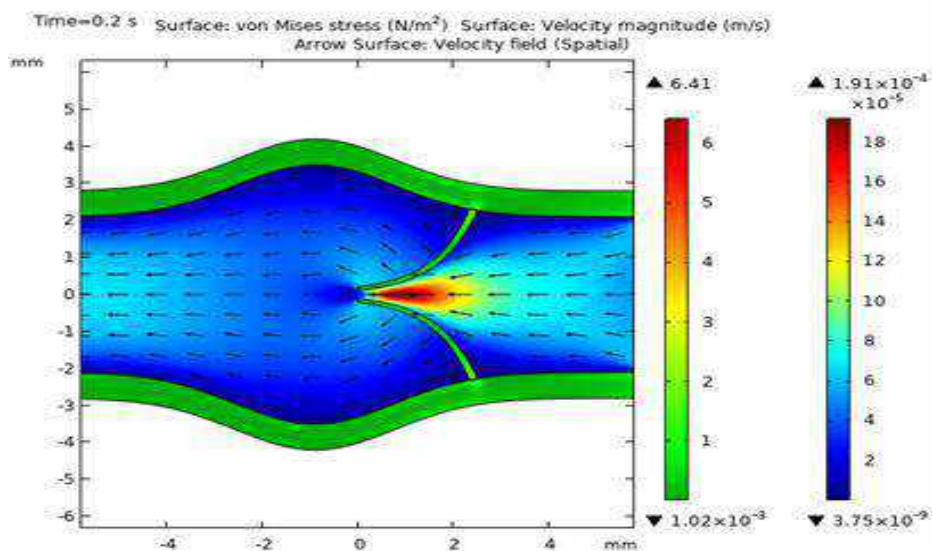


Рис. 2 – Движение крови в начальную фазу (стрелки на рисунке – вектор скорости течения)

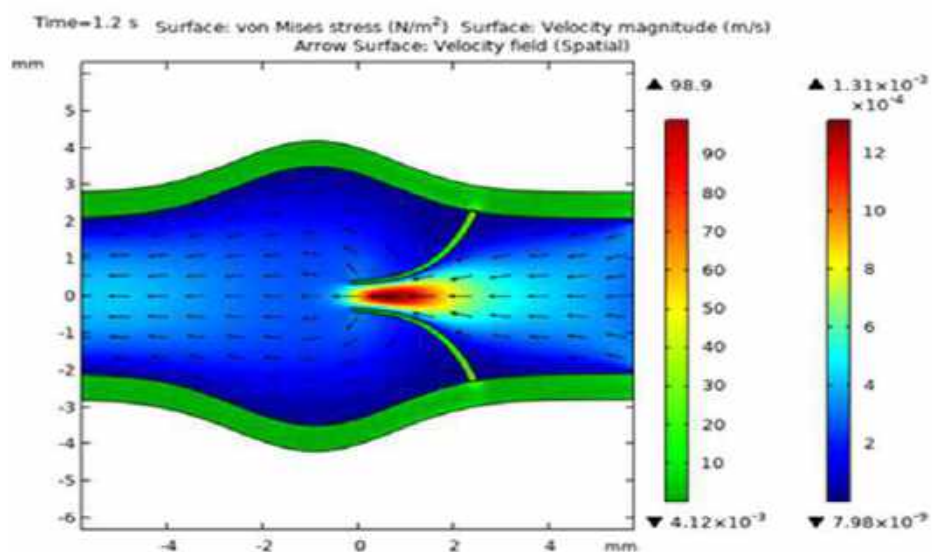


Рис. 3 – Движение крови в фазу открытия клапана (стрелки на рисунке – скорости течения)

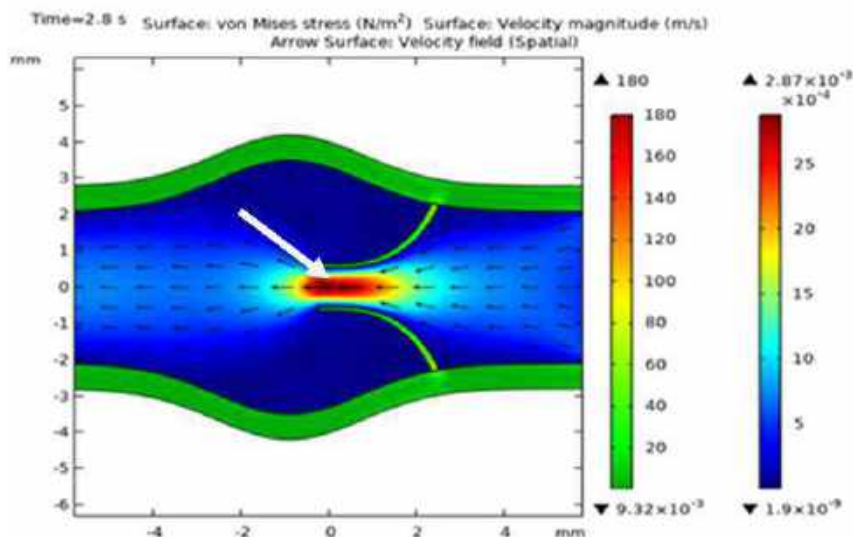


Рис. 4 – Движение крови в фазе максимального открытия (стрелки на рисунке – вектор скорости течения; белая стрелка указывает на образующийся вихрь)

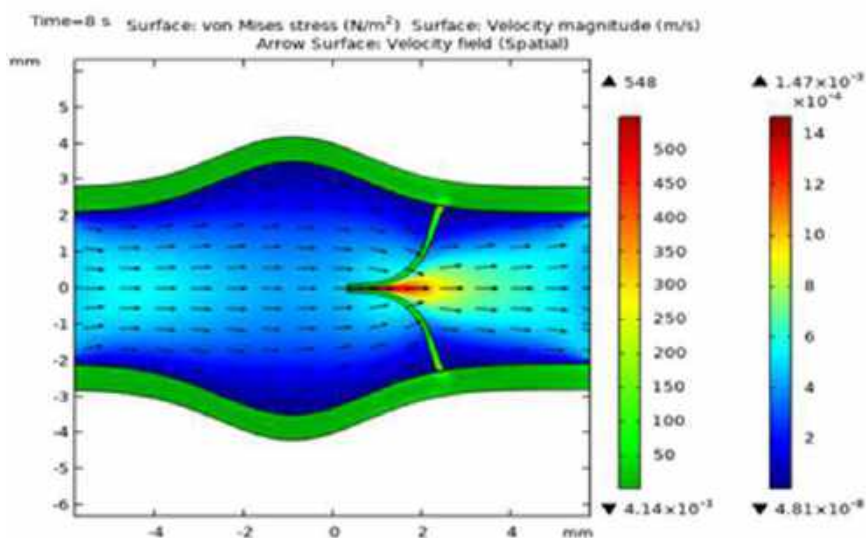


Рис. 5 – Движение крови в фазе закрытия клапана (стрелки на рисунке – вектор скорости течения)

Выявили морфологические предпосылки возникновения флеботромбоза:

1. В венах голени чаще всего возникает флеботромбоз. На этом участке представлено 2 крупных сосуда: передняя большеберцовая вена (рис. 6), задняя большеберцовая вена (рис. 7).

2. Поражение вен бедренной области – бедренной вены (рис. 8) и глубокой вены бедра (рис. 9).

3. Подвздошно-бедренная форма флеботромбоза представляет собой поражение вен не только ног, но и вен в области поясницы, ягодиц и паха (рис. 10).

4. Поражение нижней полой вены. Особенно опасная форма патологии. При этом нарушение отмечается сразу в обеих конечностях.

Выводы:

1. Градиент скорости кровотока увеличивался от входного отверстия полулунного венозного клапана до створок.

2. Через некоторое время градиент скорости снова уменьшался, пройдя через клапан.

3. Наблюдались вихри в области за клапаном, что может способствовать образованию отложений.

4. Исходя из этих особенностей кровотока в глубоких венах нижних конечностей, выявили гидродинамические предпосылки формирования венозной патологии у взрослого человека.

Литература

1. Yilmaz, F. A critical review on blood flow in large arteries; relevance to blood rheology, viscosity models and physiologic conditions / F. Yilmaz, M. Y. Gundogdu // *Kore-Australia Rheol. J.* – 2008. – № 20ю – P. 197–211.

2. Zahra, H. Fluid-structure interaction of blood flow around a vein valve / H. Zahra, F. S. Moghanlou, M. Vajdi // *BioImpacts.* – 2020. – № 10(3). – P. 169-175.

3. Aziz, N. S. Computational fluid dynamics simulation on blood velocity and vorticity of venous valve behaviour / N. S. Aziz, H. Ibrahim, S. Iqbal [et al.] / *Lecture Notes in Electrical Engineering.* – 2017. – Vol. 398. – P. 617-625.

4. Хирургические болезни : учеб. / под ред. М. И. Кузина. – М : Медицина, 2002. – 784 с.