

Е.Ю. Справцев

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ КРОВИ
ОКОЛО ВЕНОЗНОГО КЛАПАНА**

*Научные руководители: канд. техн. наук, доц. В.А. Мансуров,
д-р мед. наук, проф. Н.А. Трушель**

Кафедра медицинской и биологической физики

**Кафедра нормальной анатомии*

Белорусский государственный медицинский университет, г. Минск

E.Y. Spravtsev

**NUMERICAL SIMULATION OF BLOOD FLOW
NEAR THE VENOUS VALVE**

*Tutor: PhD, associate professor V.A. Mansurov,
MD, professor N.A. Trushel**

Department of Medical and Biological Physics

**Department of Human anatomy*

Belarusian State Medical University, Minsk

Резюме. Проблема флеботромбоза становится одной из самых актуальных в медицине. Методом математического моделирования изучили кровотоки и его особенности в области клапана вен нижней конечности.

Ключевые слова: кровоток, венозный клапан, математическое моделирование.

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.

Keywords: blood flow, venous valve, mathematical modeling.

Актуальность. Венозная система выполняет важную функцию транспорта крови обратно к сердцу. Серия односторонних клапанов, называемых венозными, проводят кровь к сердцу и предотвращают ее обратный ток. Вены нижних конечностей имеют клапаны, которые способствуют движению крови в центростремительном направлении, препятствуя обратному ее току. Несостоятельность венозных клапанов приводит к притеканию крови к ногам, нарушая работу вен и вызывая последующие заболевания, в том числе, варикозное расширение вен и флеботромбоз. [1].

Цель: посредством вычислительной гидродинамики численно смоделировать процессы движения створок венозного клапана, чтобы представить механизм движения крови в этом клапане.

Задачи:

1. Посредством вычислительной гидродинамики смоделировать движение крови в венах нижней конечности.

2. Выявить морфологические предпосылки возникновения тромбоза.

Материалы и методы. Вычислительная гидродинамика (Computational fluid dynamics, CFD) является практически, 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 кровотоков 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:

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

где $V_0 = 10$ см/с, T – период.

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

Результаты и их обсуждение. 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) кровотоков 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).

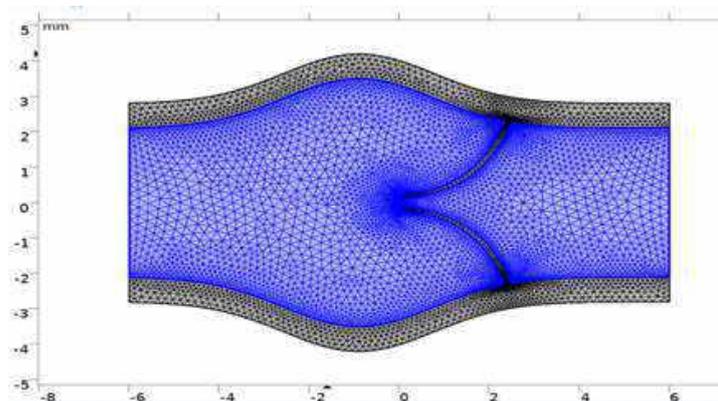


Рис. 1 – Геометрия численной модели (синий цвет – жидкость, черный цвет – упругие стенки вены и створки клапана)

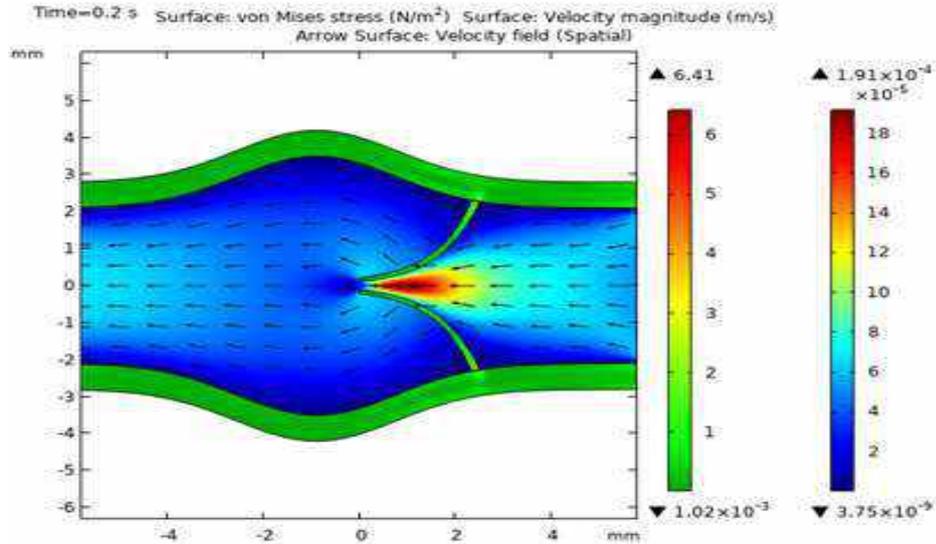


Рис. 2 – Движение крови в начальную фазу (стрелки на рисунке – вектор скорости течения)

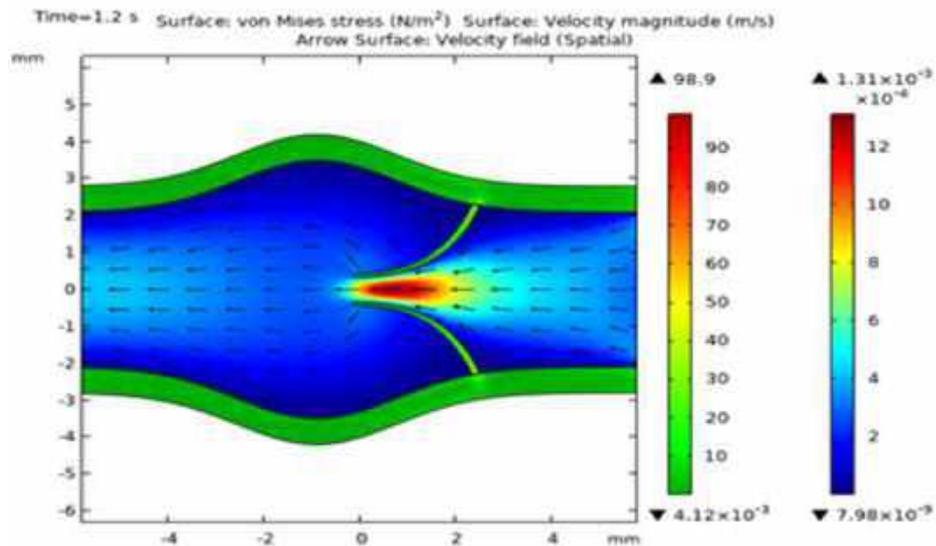


Рис. 3 – Движение крови в фазу открытия клапана (стрелки на рисунке – скорости течения)

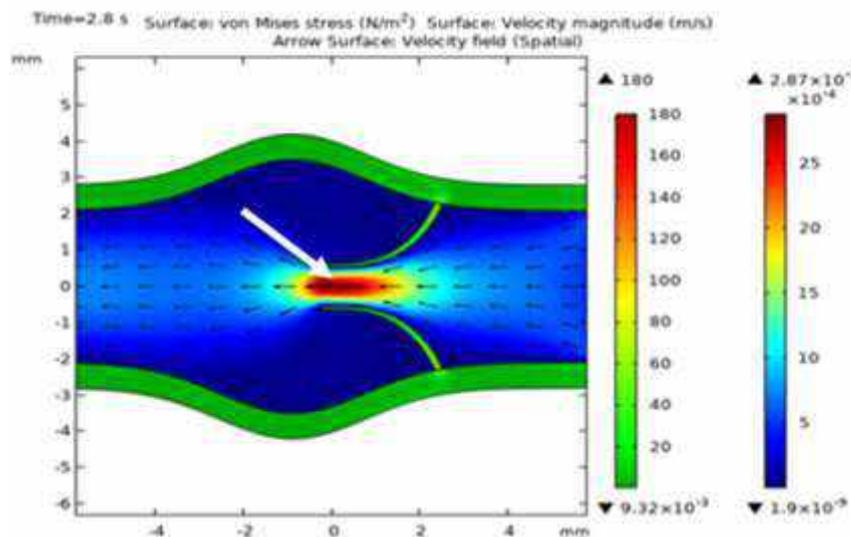


Рис. 4 – Движение крови в фазе максимального открытия (стрелки на рисунке – вектор скорости течения; белая стрелка указывает на образующийся вихрь)

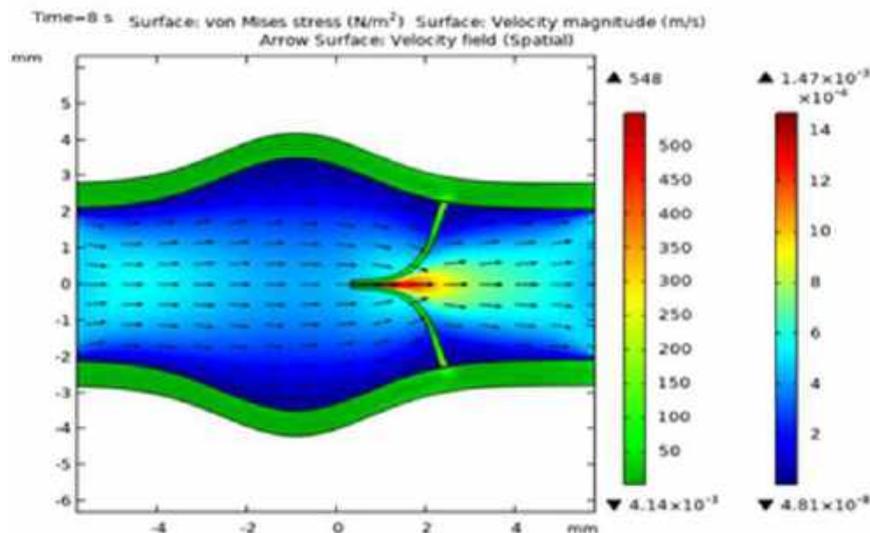


Рис. 5 – Движение крови в фазе закрытия клапана (стрелки на рисунке – вектор скорости течения)

Выводы:

1. Скорость кровотока увеличилась от входного отверстия до створок и снова уменьшилась, пройдя клапан.
2. Наблюдалась пара вихрей в области за клапаном. Эти области имеют низкое напряжение сдвига на створке, что может способствовать образованию отложений.
3. Наибольшее давление крови наблюдалось в области основания створок. В свою очередь, это может привести к повреждению эндотелия вены, отложению форменных элементов крови и формированию флелотромбоза.
4. Вычислительная гидродинамика (CFD) является полезным инструментом для исследования поведения кровотока и получения подробной информации о движении по венозной системе.

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.