

Торнадо в сердце, его самоорганизация

Мазуров М.Е.¹, Городков А.Ю.², Кикнадзе Г.И.²

¹Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова

²ФГБУ «Научный центр сердечно-сосудистой хирургии им. А.Н. Бакулева»

mazurov37@mail.ru, agorodkov@bk.ru

Приведена классификация по субстрату множества известных типов торнадо. Предложена модель торнадо как структуры, возникающей в активной среде, в которой вогнутые спиральные автоволны, возбуждают вихри, уходящие в окружающую среду. Дано точное аналитическое решение вихревых режимов уравнения Навье–Стокса для модели торнадо. Приведены результаты вычислительного моделирования вращательных вогнутых спиральных автоволн, реализующих возбуждение вихря торнадо. Показано, что торнадо в сердце, условия для возникновения которого созданы эволюцией, позволяет повысить эффективность перекачки крови из желудочков в аорты, а также из предсердий в желудочки. Показано, что для решения этих задач использовано: 1) смерчеобразное закручивание потока крови (типа торнадо); 2) специальное строение правого и левого желудочков сердца в виде мышечной структуры, обеспечивающей закрутку потока крови; 3) внутренней поверхности эндокарда в виде структурированной шероховатой стенки для обеспечения увеличения потока крови в соответствии с закручивающимися движениями стенок.

Ключевые слова: торнадо, классификация, активная среда, математическая модель активной среды, уравнение Навье–Стокса, теория вихрей, торнадо в сердце.

Tornadoes in the heart, its self-organization

Mazurov M.E.¹, Gorodkov A.Yu.², Kiknadze G.I.²

¹Russian Economic University G.V. Plekhanova

²FGBU "Scientific Center of Cardiovascular Surgery named after A.N. Bakulev"

A classification by substrate of a number of known types of tornadoes is given. A tornado model is proposed as a structure that arises in an active medium in which concave spiral autowaves excite vortices that escape into the environment. An exact analytical solution of the vortex regimes of the Navier–Stokes equation for the tornado model is given. The results of computational modeling of rotational concave spiral autowaves realizing the excitation of a tornado vortex are presented. It has been shown that a tornado in the heart, the conditions for which are created by evolution, makes it possible to increase the efficiency of pumping blood from the ventricles into the aorta, as well as from the atria to the ventricles. It is shown that the following was used to solve these problems: 1) tornado-like twisting of the blood stream (of the tornado type); 2) a special structure of the right and left ventricles of the heart in the form of a muscular structure providing a twist of the blood flow; 3) the inner surface of the endocardium in the form of a structured roughened wall to ensure an increase in blood flow in accordance with the twisting movements of the walls.

Key words: tornado, classification, active medium, mathematical model of the active medium, Navier–Stokes equation, vortex theory, tornado in the heart.

Классификация торнадо

Естественной представляется классификация торнадо по субстрату, из которого состоит торнадо [1–3]. Рассмотрим классификацию по субстрату вихря: 1) атмосферные – воздушные; 2) электрические; 3) огненные; 4) пылевые; 5) жидкостные – водяные; 6) снежные. Различные по субстрату торнадо показаны на рисунке 1.

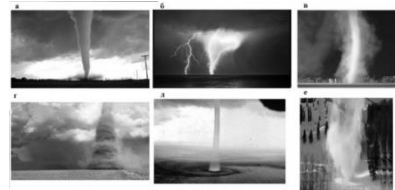


Рис. 1. Торнадо различные по субстрату: а) атмосферные – воздушные; б) электрические; в) огненные; г) пылевые; д) жидкостные – водяные; е) снежные.

Модель торнадо

Определение. Торнадо – структура, возникающая в неоднородной активной среде, в которой возбужденные автоколебательные вогнутые спиральные автоволны (ВСА), переносящие энергию, возбуждают вихри, уходящие в окружающую среду [4–6].

Структурная схема торнадо согласно предлагаемой модели показана на рисунке 2.

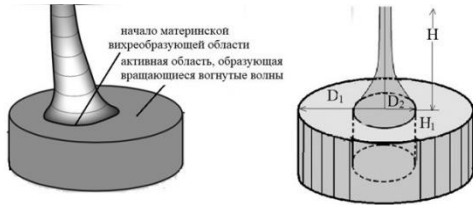


Рис. 2. Структурная схема торнадо.

Согласно определению структуры торнадо, его свойства определяются одновременно свойствами активной среды и субстратом.

Математическая модель торнадо

Рассмотрим математическую модель активной среды торнадо. Для описания активной среды в синергетике принято использовать системы нелинейных дифференциальных уравнений параболического типа [4–6]:

$$\frac{\partial E_i}{\partial t} = F_i(E_1, \dots, E_n) + D_i \Delta E_i \quad (i = 1, \dots, n), \quad (1)$$

где E_i – переменные, ΔE_i – лапласиан, F_i – нелинейные функции, D_i – коэффициенты диффузии. В качестве модели активной среды в вычислительном эксперименте были использованы уравнения ФитцХью–Нагумо [7]:

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= x_1 - \frac{x_1^3}{3} - x_2 + I + D_1 \Delta x_1, \\ \frac{dx_2}{dt} &= \varepsilon(a - x_1 + bx_2) + D_2 \Delta x_2. \end{aligned} \quad (2)$$

где x_1, x_2 – переменные, x_1 – плотность субстанции торнадо (воздух, жидкость); I – плотность потока субстанции; a, b, ε – параметры: $a = 0.7, b = 0.8, I = 0.142, D_1, D_2$ – коэффициенты диффузии.

Уравнения Навье–Стокса

Для математического описания образования вихревой воронки торнадо используем уравнения Навье–Стокса. Система состоит из двух уравнений: уравнения движения; уравнения неразрывности. В векторном виде они имеют вид [8]

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = -(\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} + \nu \Delta \mathbf{v} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \mathbf{f}; \quad \nabla \cdot \mathbf{v} = 0,$$

где $\mathbf{v} = (\mathbf{v}^1, \dots, \mathbf{v}^n)$ – векторное поле скоростей, p – давление, ∇ – оператор Гамильтона, Δ – оператор Лапласа, t – время, ν – коэффициент

кинематической вязкости, ρ – плотность, \mathbf{f} – векторное поле сил. Краевые и начальные условия:

$$\mathbf{v}|_{\partial \Omega} = 0, \quad \mathbf{v}|_{t=0} = \mathbf{v}_0.$$

Точные решения Навье–Стокса

Торнадо – вихрь раскручивается в материнской области за счет ВСА, возникающих в активной среде и охватывающих поверхность цилиндрической материнской области, показанной на рисунке 2. Уравнение Навье–Стокса для рассматриваемой цилиндрической материнской области, как показано в работах Г.И. Кикнадзе и Г.К. Краснова [9, 10] имеет точное аналитическое решение, которое можно представить в виде:

$$V_r = -C_0(t)r; \quad V_z = 2C_0(t)z + C_1(\tau),$$

$$V_\varphi = \frac{\Gamma_0(t)}{2\pi r} \left[1 - \exp\left(\frac{-C_0(t)r^2}{2\nu}\right) \right].$$

$C_0(t) = -V_r/R$ – произвольная функция, зависящая от времени, определяющая сжатие струи (sec^{-1}); $\Gamma_0(t)$ – произвольная функция, зависящая от времени, определяющая циркуляцию струи (m^2/sec); $C_1(t)$ – произвольная функция, зависящая от времени, определяющая величину V_z в плоскости $Z = 0$ в момент времени t (m/sec); ν – кинематическая вязкость (sec/m^2).

Точным решениям можно придать геометрическую интерпретацию на рисунке 3.

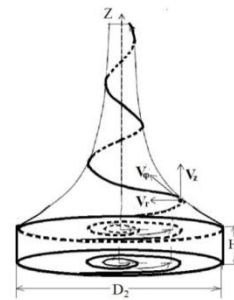


Рис. 3. Образование вихря в материнской области согласно точному аналитическому решению уравнений Навье–Стокса, полученному Г.И. Кикнадзе и Г.К. Красновым [9, 10]. На рисунке 4 D_2, H_1 – диаметр и высота материнской области.

Моделирование образования вогнутых спиральных автоволн, переносящих энергию

Для конкретной реализации ВСА была использована неоднородная круговая область, разбитая на кольца. В качестве активной среды для генерации ВСА была использована система из двух нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных, а именно уравнения ФитцХью–Нагумо(2) [7].

Параметры уравнения (2) в каждом кольце подбирались таким образом, чтобы обеспечить

необходимую для образования вогнутой автоволны скорость распространения в каждом кольце. Эта скорость должна убывать по мере уменьшения наружного и внутреннего диаметров кольца. Вогнутая автоволна показана на рисунке 4 слева.

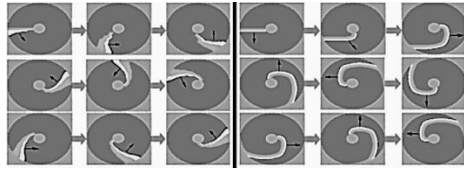


Рис. 4. Вогнутая автоволна в модели ФитцХью–Нагумо показана слева. Для сравнения выпуклая автоволна, в однородной круговой области, идущая из центра области, показана справа.

Распространение возбуждения в данной области возможно только при наличии кругового возбуждения у края области. Внутри краевого кольца активная среда может быть и невозбудимой.

Начальные условия для возбуждения круговых вращательных движений активной среды

Уравнение (1) в двумерной области имеет бесконечно большое количество топологически различных решений. Конкретное решение из бесконечно большого их количества может быть получено путем задания начальных условий [4–6]. Начальные условия для возникновения круговых автоволн в активной среде предсердий человека обсуждались в работе [4–6].

Свойства вихревых воронок. Возможные множества вихревых движений

Свойства вихревых воронок торнадо существенно зависят от интенсивности первоначальной раскрутки вихря. Это можно наглядно наблюдать на искусственных водяных воронках с первоначальной раскруткой, например, с помощью круговой пластины с лопатками. Примеры таких вихрей показаны на рисунке 5.

На рисунке 5 слева – водяная воронка, получаемая при минимальной скорости раскрутки. На рисунке 5 справа – вихревая воронка, получаемая при максимальной скорости раскрутки. В центре – вихревая воронка при промежуточной скорости раскрутки.



Рис. 5. Искусственные жидкие водяные воронки с различной скоростью первоначальной раскрутки.

Торнадо в сердце

Желудочки и предсердия в сердце каждое можно грубо сравнить с резиновым мешком, наполненным жидкостью и имеющим небольшое отверстие для выпуска жидкости. Такая система будет работать не оптимально с малым коэффициентом полезного действия. Иллюстрация простейшей системы выпуска жидкости показана на рисунке 6.

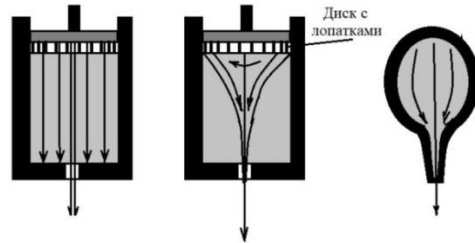


Рис. 6. Иллюстрация простейшей системы выпуска жидкости через отверстие.

На рисунке 6 в центре показан выпуск с помощью смерча – торнадо, образованного вращением диска с лопатками. Поток жидкости с помощью вихря – торнадо концентрируется в центре отверстия, благодаря чему коэффициент полезного действия системы заметно увеличивается. Повышению эффективности выпуска жидкости может способствовать грушеобразная форма сосуда, что иллюстрируется на рисунке 6 справа.

О физиологии кровообращения в сердце

В физиологии кровообращения доминируют представления о ламинарном и турбулентном движении крови в кровеносных сосудах [11–15].

В то же время экспериментально было показано, что важной особенностью течения в восходящем отделе и дуге аорты у большинства здоровых людей является закрутка потока крови по часовой стрелке по ходу кровотока [12–15].

Основной макроскопической функцией сердца является эффективный выброс крови в аорты грудную и легочную. Для решения этих задач эволюция использовала следующие решения: 1) смерчеобразное закручивание потока крови (типа торнадо); 2) специальное строение правого и левого желудочков сердца в виде мышечной структуры, обеспечивающей закрутку потока крови; 3) внутренней поверхности эндокарда в виде структурированной шероховатой стенки для обеспечения увеличения потока крови закручивающимися движениями стенок.

Последовательность образования торнадоподобного потока крови в сердце

Для обеспечения безотрывного и безударного течения при каждом столкновении притекающего и остаточного течений должна происходить их «сшивка», сопровождаемая обменом циркуляцией и

массой. Этапы эволюции внутрисердечного потока крови схематично представлены на рисунке 7.

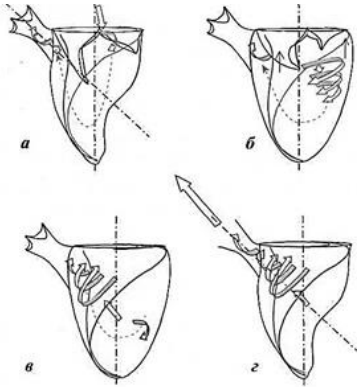


Рис. 7. Схема основных этапов эволюции потока крови внутри полости левого желудочка.

Для проверки теоретических предпосылок, объясняющих торнадообразное движение крови, были выполнены эксперименты с визуализацией движения модельной жидкости с помощью частиц. Установлена возможность образования торнадоподобного движения крови [13, 14]. Такая организация вихревого движения крови обеспечивает более эффективное её продвижение в аорты.

Организация мышечного сокращения сердца

Рассмотрим мышечную структуру сердца, реализующую режим движения крови, основанный на использовании свойств вогнутых спиральных автоволн, переносящих энергию для реализации вихревого торнадообразного движения крови. Мышечные волокна сердца по спирали спускаются к верхушке сердца, а затем снова поднимаются к его основанию, как показано на рисунке 8,а [16, стр. 89–91].

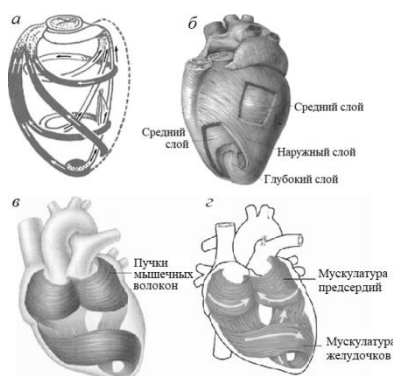


Рис. 8. Схематическое изображение структуры мышечных волокон сердца [16, стр. 89–91]. Каждый пучок волокон обвивает желудочки сердца, от верхушки сердца до аорты.

На рисунке 8 показано: а) мышечные волокна сердца по спирали спускаются к верхушке сердца, а затем снова поднимаются к его основанию, образуя хиральную систему. б) показано анатомическое

строение мышечных волокон сердца. Каждый пучок волокон обвивает желудочки сердца от верхушки до основания, образуя хиральную систему волокон. в) показано анатомическое строение мышечных волокон сердца. Мышечные волокна предсердия также образуют хиральную систему, как это видно из рисунка 8,в и 8,г.

Анатомическая структура сердца при удаленном эпикарде, иллюстрирующая мышечный слой желудочков сердца, при виде со стороны верхушки сердца, показана на рисунке 8,б. На рисунке 8,б показаны мышечные слои сердца: наружный слой, средний слой, глубокий слой. Наличие трех дублирующих мышечных слоев позволяет повысить надежность работы сердца и предотвратить негативные последствия при инфаркте миокарда. Сокращения всех трех слоев суммируются, повышая эффективность выбрасывания крови. Накачка сердца кровью после её выбрасывания в аорты, легочную и венечные осуществляется с помощью синхронного вбрасывания крови из предсердий. Механическая работа предсердий также осуществляется за счет реализации вогнутых спиральных автоволн, переносящих энергию и реализуемых мышечной структурой предсердий, что показано на рисунке 8,в и г. Мышечные волокна сердца формируют вогнутую волну механического сокращения при отсутствии жесткого скелета в сердце (в сердце имеются только гибкие фиброзные волокна). Интересно отметить, что при окончании систолы происходит круговое движение, похожее на отжим белья прачкой, что позволяет осуществить более полное изгнание крови из желудочков сердца.

Отметим, что изучение макроскопической механической деятельности сердца требует дальнейших экспериментальных и практических исследований.

Геометрическая конфигурация полости ЛЖ в норме и при ремоделировании

Влияние мышечной структуры сердца, геометрия этой структуры были изучены экспериментально при исследовании сердец умерших людей. Результаты исследований иллюстрируются рисунком 9.

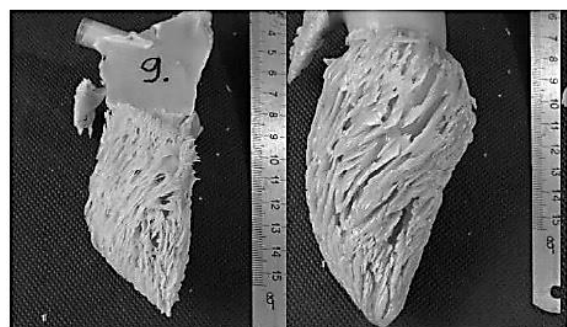


Рис. 9. Геометрия мышечной структуры сердца умерших людей в режиме сокращения норма-систола – слева, норма-диастола – справа.

Исследование геометрии мышечной структуры сердца подтверждает теорию об образовании торнадо в сердце для повышения эффективности выброса крови в аорты.

Список литературы

1. Наливкин Д.В. *Ураганы, бури, смерчи*. М.: Наука, 1969. 487 с.
2. Наливкин Д.В. *Смерчи*. М.: Наука, 1984. 111 с.
3. Вараксин А.Ю., Ромаш М.Э., Копейцев В.Н. *Торнадо*. М.: Физматлит, 2011. 344 с.
4. Мазуров М.Е. Нелинейные вогнутые спиральные автоволны и их приложения. *Изв. РАН. Серия физическая*. 2018. Т. 82. № 1. С. 72–77.
5. Мазуров М.Е., Калюжный И.М. О вогнутых автоволнах. В: *Математическая биология и биоинформатика: сборник докладов V Международной конференции*. Под ред. В.Д. Лахно. М.: МАКС Пресс, 2014. С. 49–50.
6. Мазуров М.Е., Калюжный И.М. Автоволны кругового типа в предсердиях человека и начальные условия для их возникновения. *Вестник МГУ. Серия: Физика, Астрономия*. 2014. № 3. 45–49.
7. Nagumo J.S., Arimoto S., Yoshizawa S. An active pulse transmission line simulating nerve axon. *Proc. IRE*. 1962. V. 50. P. 2061–2071.
8. Темам Р. *Уравнения Навье–Стокса. Теория и численный анализ* (2-е изд). М.: Мир, 1981. 408 с.
9. Кикнадзе Г.И., Краснов Ю.К. Эволюция смерчеобразных течений вязкой жидкости. *ДАН*. 1986. Т. 290. № 6. С. 1315–1319.
10. Кикнадзе Г.И., Олейников В.Г., Гачечиладзе И.А. и др. О структуре потока в левом желудочке сердца и аорте с применением точных решений нестационарных уравнений гидродинамики и морфометрических исследований. *ДАН*. 1996. Т. 351. № 1. С. 119–122.
11. Педли Т. *Гидродинамика крупных кровеносных сосудов*. М.: Мир, 1983. 400 с.
12. Кузьмина Н.Б., Дрогайцев А.Д. Формирование потока крови в полости левого желудочка. В: *Руководство по физиологии. Физиология кровообращения. Физиология сердца*. Ленинград: Наука, 1980. С. 212–214.
13. Бокерия Л.А., Кикнадзе Г.И., Гачечиладзе И.А., Габидуллина Р.Ф., Макаренко В.Н., Городков А.Ю. Анализ структуры внутрисердечного потока крови на основании исследований архитектоники трабекулярного слоя левого желудочка. *Клиническая физиология кровообращения*. 2011. № 4. С. 18–28.
14. Городков А.Ю. *Количественный анализ структурной организации пульсирующего потока крови в левом желудочке сердца и аорте*: дис. ... д-ра биол. наук: 03.00.13. Москва, 2004. 233 с.
15. Kilner P.J., Yang G.Z., Mohiaddin R.H., Firmin D.N., Longmore D.B. Helical and retrograde secondary flow patterns in the aortic arch studied by three-directional magnetic resonance velocity mapping. *Circulation*. 1993. V. 88. № 1. P. 2235–2247.
16. Швенк Т. *Чувствующий хаос*. Москва: Новый центр, 2003. 216 с.