

1.7 Ламинарное и турбулентное течения. Число Рейнольдса. Условия проявления турбулентности в системе кровообращения.

Ламинарное течение – упорядоченный режим течения вязкой жидкости, характеризующийся отсутствием перемешивания между слоями жидкости.

Течение жидкости с завихрениями называется турбулентным.

При малых скоростях течения случайно возникающие в потоке завихрения гаснут, не вызывая заметного перемешивания слоев. При высоких скоростях течения жидкости создаются условия, при которых течение перестает быть устойчивым и под влиянием случайных возмущений переходит в турбулентное.

Наличие условий, при которых ламинарное течение перестает быть устойчивым, зависит от числа Рейнольдса:

$$Re = \frac{v \cdot S \cdot \rho}{\eta} \quad (25)$$

где v – скорость течения жидкости, S – сечение трубы, ρ – плотность жидкости, η – вязкость жидкости.

Как правило, значение критического числа Рейнольдса определяют экспериментально. Для гладких труб $Re_{кр} = 2300$.

Если $Re_{кр}$ известно, то становится возможным для любой жидкости и разных условий ее течения предсказать, будет ли ее поток ламинарным или турбулентным. Если для определенного течения число Рейнольдса не превышает некоторого критического значения $Re_{кр}$, ламинарное течение устойчиво. Если же $Re > Re_{кр}$, то в потоке жидкости возникают завихрения – ее течение становится турбулентным.

$Re_{кр}$ для крови равно $900 \div 1600$. Движение крови в организме, в основном, ламинарное. Однако, при определенных условиях, кровоток может приобретать и турбулентный характер.

Турбулентность проявляется в полостях сердца (велико значение d), в аорте и вблизи клапанов сердца (высокая скорость движения крови). При интенсивной физической нагрузке скорость движения крови увеличивается, и это может вызвать турбулентность в кровотоке.

С уменьшением вязкости турбулентный характер течения жидкости может проявляться и при сравнительно небольшой скорости ее движения (см. формулу 25). Поэтому, при некоторых патологических процессах,

приводящих к аномальному снижению вязкости крови, кровотоки в крупных кровеносных сосудах могут стать турбулентными.

Кровеносный сосуд не всегда можно моделировать гладкой трубой. В частности, при наличии атеросклеротических бляшек в просвете сосудов имеются локальные сужения, приводящие к возникновению турбулентности в течении крови. Турбулентность в кровотоке сопровождается шумами, прослушиваемыми с помощью фонендоскопа.

1.8. Роль эластичности кровеносных сосудов в системе кровообращения. Пульсовая волна.

При сокращении сердца крупные кровеносные сосуды на некоторое время накапливают кровь. Кинетическая энергия выбрасываемой из сердца крови частично переходит в потенциальную энергию упругой деформации стенок аорты и крупных артерий. При диастоле происходит обратный процесс - потенциальная энергия деформированных артерий трансформируется в кинетическую энергию крови. Эластичные кровеносные сосуды как бы «дорабатывают» усилие сердца. Сердце является источником возбуждения колебаний давления на стенки кровеносных сосудов. Эти колебания распространяются по сосудистой системе, и возникающую при этом волну давления называют пульсовой волной.

Пульсовой волной называют волну повышенного давления, распространяющуюся по аорте и артериям, вызванную выбросом крови из левого желудочка в период систолы.

Пульсовая волна является затухающей волной. Происходит также сдвиг колебаний по фазе, который увеличивается с возрастанием расстояния от сердца до рассматриваемого участка сосудистой системы.

Пульсовая волна может быть представлена как сумма простых гармонических волн. Гармонический анализ пульсовых колебаний кровотока является одним из важных методов его изучения. Первая гармоническая составляющая пульсовой волны давления может быть записана в следующем виде:

$$P_1 = P_0 e^{-\alpha x} \sin \omega(t - x/v), (26)$$

где P_0 - амплитуда пульсовых колебаний, t - время, x - расстояние от сердца до данной точки, ω - циклическая (круговая) частота сердечных сокращений, v - скорость распространения пульсовой волны, α - коэффициент затухания, определяемый по характеристикам сосудистой системы.

Эластичность сосуда уменьшается с увеличением расстояния от сердца до периферии. Это обусловлено изменением относительного содержания эластина и коллагена в сосудистой ткани. С удалением от сердца

увеличивается доля гладких мышечных волокон, которые в артериолах являются уже основной составляющей сосудистой ткани.

Скорость распространения пульсовой волны в крупных кровеносных сосудах определяется по формуле Моенса-Кортевега:

$$v = \sqrt{\frac{Eh}{\rho d}}, \quad (27)$$

где E - модуль упругости сосуда, h - толщина его стенки, d - диаметр сосуда, ρ - плотность крови.

Из формулы (27) следует: с увеличением жесткости сосуда и увеличением толщины его стенки скорость пульсовой волны возрастает.

В аорте она равна 4-6 м/с, в артериях мышечного типа - 8-12 м/с. Скорость распространения пульсовой волны намного больше линейной скорости кровотока, не превышающей в покое 0,5 м/с.

Поскольку с возрастом эластичность сосудов снижается (модуль упругости растет), то скорость пульсовой волны возрастает в 2-3 раза. Она растет и с увеличением давления. При повышенном давлении сосуд несколько растягивается, становится более «напряженным», и для его дальнейшего растяжения требуется большее усилие.

Форма пульсовых колебаний и их характеристики являются отражением работы сердца и состояния сосудистой системы.

Наряду с пульсовой волной в кровеносной системе распространяются и звуковые волны, скорость которых велика. Таким образом, в системе кровеносных сосудов выделяют три основных волновых процесса:

1. перемещение частиц крови (0,5 м/с),
2. распространение пульсовой волны (10 м/с),
3. распространение звуковых волн (1500 м/с).