

Реологические свойства крови

Н.В.Леонтьева

«Северо-Западный Государственный Медицинский Университет
имени И.И.Мечникова

Реология (греч., rheo - течение, logos – поток) – наука о течении и деформации реальных сплошных сред, обладающих вязкостью, пластичностью, упругостью. Деформация – изменение положения частиц тела относительно друг друга, обусловленное их перемещением.

Реальная среда состоит из атомов и молекул, находящихся в постоянном движении и взаимодействующих между собой. В понятие сплошные среды включают жидкости и твердые тела. Сплошным средам присущи свойства переноса, такие как диффузия, теплопроводность, вязкость.

Деформируемые среды подразделяют на жидкости и твердые тела. В жидкостях при приложении к ним касательных напряжений, постоянных во времени, происходит течение и, следовательно, деформация их неограниченно возрастает. Жидкие среды составляют наибольшую часть организма. Именно перемещение жидких сред обеспечивает снабжение клеток кислородом, субстратами для синтеза и уровень метаболической активности клеток. Деформируемые среды подразделяются на сжимаемые и несжимаемые. Все реальные среды обладают хотя бы минимальной, но конечной сжимаемостью.

Основным количественным соотношением, описывающим течение идеальной, то есть абсолютно несжимаемой и невязкой, жидкости является уравнение Бернулли (1):

$$\rho v^2/2 + P + \rho gh = \text{const} \quad (1)$$

где: $\rho v^2/2$ - динамическое давление, обусловленное движением жидкости;

P - статическое давление, не связанное с движением жидкости (оно может быть измерено, например, манометром, движущимся вместе с жидкостью); ρgh - гидростатическое давление, то есть давление столба жидкости на нижнее основание.

В уравнении Бернулли первое слагаемое - $\rho v^2/2$ - представляет кинетическую энергию жидкости, второе и третье - P и ρgh - потенциальную энергию. Следовательно, их сумму (полное давление) можно считать мерой полной механической энергии жидкости.

Гидростатическое давление - давление, определяемое силой тяжести жидкости, величина которого зависит от глубины под поверхностью жидкости и, в соответствии с законом Паскаля, в данной точке жидкости будет одинаковым по всем направлениям. Потенциальная энергия неподвижной жидкости расходуется на поддержание гидростатического давления. При движении жидкости часть потенциальной энергии переходит в кинетическую энергию, которая расходуется и обеспечивает движение этой жидкости. Отсюда, чем больше объем жидкости и ниже скорость ее движения, тем выше гидростатическое давление.

Гидростатическое давление в сосудистой системе зависит от периферического сопротивления и объема циркулирующей крови. У больных с сердечно-сосудистой недостаточностью повышение гидростатического давления способствует увеличению водного объема интерстициального сектора. При гиповолемии объем воды межклеточного пространства уменьшается.

Уравнение Бернулли утверждает, что сумма разнопричинных давлений в жидкости является постоянной

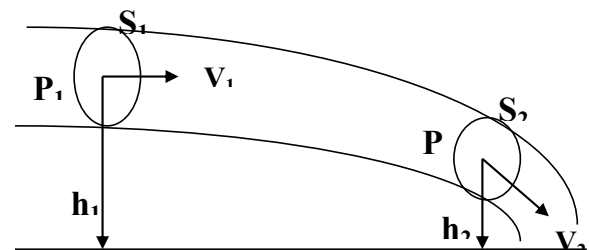


Рис.25. Течение идеальной жидкости по трубе (по Бернулли)

величиной, и выражает закон сохранения энергии движущейся жидкости (рис.25). Согласно ему отдельные виды механической энергии текущей жидкости могут изменяться, но при этом их сумма остается неизменной. При течении реальной жидкости отдельные слои ее воздействуют друг на друга с силами, касательными к слоям. Это явление называют внутренним трением, или вязкостью. Вязкость зависит от движения молекул и наличия молекулярных сил. Наличие сил внутреннего трения в жидкости приводит к тому, что ее различные слои движутся с различными скоростями.

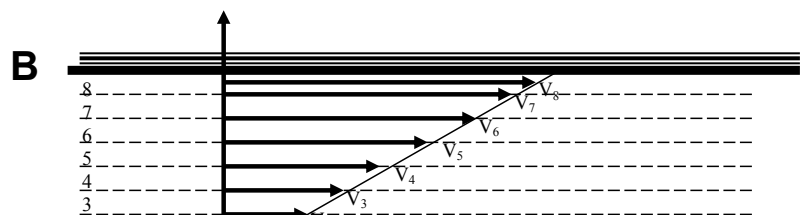


Рис.26. Течение жидкости между двумя твердыми пластинами: верхняя В - движется со скоростью V8, нижняя А - неподвижна V0.

Течение вязкой жидкости можно представить между двумя твердыми пластинами (рис.26): нижняя пластина А неподвижна, а верхняя пластина В движется со скоростью V_8 . При этом движущаяся между ними жидкость состоит из нескольких слоев - 1,2,3,4 и т. д. Слой, находящийся на неподвижной пластине, не движется. По мере удаления от нижней пластины слои жидкости приобретают все большие скорости. Максимальная скорость будет у слоя, непосредственно примыкающего к движущейся пластине.

Известно, что слои, расположенные рядом, воздействуют друг на друга. Например, четвертый слой стремится ускорить движение третьего, но при этом испытывает торможение с его стороны, а пятый слой

оказывает ускоряющее действие на четвертый и т.д. Сила внутреннего трения между слоями пропорциональна площади взаимодействующих слоев, и она тем больше, чем больше их относительная скорость. Вследствие взаимодействия частиц жидкости каждый нижний её слой испытывает со стороны прилегающего верхнего слоя действие силы сдвига, которая стремится ускорить ее движение. Напротив, на верхний слой со стороны нижнего слоя действует сила, которая тормозит его движение. Следовательно, внешняя действующая сила, приложенная к пластинке В, уравнивается этими силами внутреннего трения, или вязкостью жидкости. Течение каждого слоя происходит с постоянной, но различной скоростью.

Ньютон в 1687 году сформулировал основной закон вязкого течения: сила внутреннего трения зависит от изменения скорости, отнесенного к длине в направлении, перпендикулярном скорости.

Иными словами, сила внутреннего трения зависит от величины различий в скорости движения слоев жидкости, которая количественно характеризуется градиентом скорости dv/dx , называемым также скоростью сдвига. Значение градиента скорости жидкости, текущей по трубе, так же как и величина скорости, изменяется от стенок к центру (рис.27). Однако, если скорость минимальна у стенок и максимальна в центре, то значение градиента, наоборот, максимально у стенок и минимально вблизи центра.

Сила внутреннего трения нашла свое выражение в уравнении Ньютона (2).

$$F_{тр} = \eta \, dv/dx \, S \quad (2)$$

где: S – площадь соприкосновения движущихся слоев жидкости;

η – коэффициент внутреннего трения (динамическая вязкость, или вязкость); зависит от свойств жидкости и температуры;

dv/dx – градиент скорости

В тех случаях, когда вязкость жидкостей зависит только от их природы и температуры и не зависит от градиента скорости, такие жидкости называют ньютоновскими, их описывают уравнением Ньютона. Движение однородной ньютоновской жидкости характеризуется максимальной скоростью ее частиц по оси сосуда и минимальной – у стенок. Соединяя концы векторов скорости различных частиц жидкости, получим линию – профиль скорости. Для ньютоновской жидкости он имеет вид параболы (рис.27).

Вязкость жидкости существенным образом зависит от молекулярных свойств растворенных в ней веществ. Жидкости, в состав которых входят крупные и сложные молекулы (белки, липопротеиды, полимеры), образующие пространственные структуры, не подчиняются уравнению Ньютона. Такие жидкости называют неньютоновскими. При течении неоднородной по структуре жидкости её вязкость зависит от градиента скорости, причем вяз-

кость неньютоновских жидкостей увеличивается при уменьшении скорости тока жидкости (рис.28). Следует подчеркнуть, что вязкость неньютоновских жидкостей

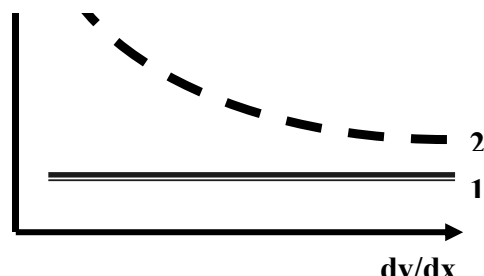


Рис.28. Соотношение между вязкостью и скоростью сдвига для ньютоновских (1) и неньютоновских (2) жидкостей

значительно больше, чем ньютоновских. Это объясняется тем, что при течении таких жидкостей работа внешней силы затрачивается не только на преодоление истинной, ньютоновской вязкости, но и на перемещение и разрушение пространственных структур.

Вязкость ньютоновских жидкостей называют нормальной вязкостью, а неньютоновских – аномальной вязкостью.

Единицей вязкости в Международной системе СИ является паскаль-секунда – Па.с.

Применяется и внесистемная (СГС) единица вязкости – пуаз (П), причем, 1 Па.с = 10 П.

Кровь, вследствие сложного многокомпонентного состава относится к неньютоновской жидкости. Свойства несжимаемой (неньютоновской) жидкости, к которой относится кровь, обусловлены наличием в жидкости форменных элементов (эритроциты, лейкоциты, тромбоциты), взвешенных частиц, крупных молекул и молекулярных агрегатов. Они изменяют картину течения жидкой фазы, искривляя и запутывая линии тока. Это значит, что из-за различных градиентов скорости, реализующихся в движущейся крови, ее вязкость в различных участках сосудистой системы может изменяться.

На реологические свойства крови влияют собственные свойства структурных элементов, такие как деформируемость и прочность клеток, особенности их движения (вращение и ориентация в потоке), способность объединяться в агрегаты.

Механические свойства крови характеризуются плотностью и вязкостью.

Плотность цельной крови человека равна $(1,052-1,064) \times 10^3$ кг/м³. В первую очередь плотность крови зависит от количества в ней эритроцитов. Поэтому нормальная функция системы кровообращения не оказывает существенного влияния на плотность крови. При кровопотере плотность изменяется пропорционального уменьшению объема крови.

Вязкость крови в норме при температуре 200С составляет 4-5 мПа.с, а вязкость воды – 1 мПа.с.

Относительная вязкость крови – отношение вязкости крови к вязкости воды.

Основными факторами, определяющими вязкость крови, являются гематокрит, температура тела, скорость кровотока, вязкость плазмы, которая зависит от концентрации белков. При различных патологических процессах и заболеваниях значения вязкости крови могут существенно меняться в пределах от 1,7 до 22,9 мПа.с. Приведенные численные значения характеризуют среднюю вязкость крови в крупных кровеносных сосудах, или вязкость

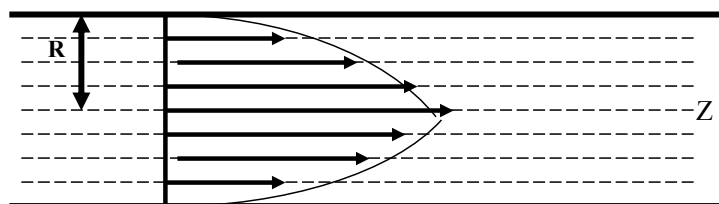


Рис.27. Распределение скоростей вязкой жидкости, текущей по трубе

проб крови вне организма, измеренную капиллярными методами. Неоднородность структуры крови, специфика строения и разветвления кровеносных сосудов приводит к довольно сложному распределению вязкости крови, движущейся по сосудистой системе.

Гематокрит (Ht) - отношение суммарного объема эритроцитов (Vэр) к объему плазмы крови (Vпл), в котором они содержатся.

$$V_{эр}/V_{пл} = 0,40$$

В зависимости от пола и возраста значения гематокрита могут в определенной степени варьировать (табл.7).

Таблица 7.

Нормальные значения гематокрита для лиц различных групп	
Группы пациентов	Значение гематокрита (%)
Мужчины	41-48
Женщины	36-42
Дети	34-40
Новорожденные	45-67
Пациенты на гемодиализе	20-35

У новорожденных гематокрит примерно на 10% выше, с возрастом у детей значения гематокрита постепенно приближаются к таковым у взрослого человека. У здорового человека величина гематокрита стабильна и может изменяться только при адаптации к большим высотам.

Повышение гематокрита сопровождается увеличением вязкости крови. Это может происходить из-за увеличения концентрации эритроцитов при истинной полицитемии и компенсаторных эритроцитозах, при макроцитозе и высокой агрегационной активности красных кровяных телец. Вязкость венозной крови выше артериальной, так как в венозной крови повышено содержание углекислого газа. Вследствие этого эритроциты венозной крови имеют большие размеры, чем эритроциты артериальной крови, и другую форму.

Гемодилюция и анемии сопровождаются уменьшением гематокрита. Во время оперативного вмешательства оптимальным уровнем гематокрита считается 30- 35%, так как такой состав крови обеспечивает наибольшую доставку кислорода к тканям. Минимальный допустимый гематокрит, рекомендуемый до операции, должен быть не ниже 25%. Планирование интраоперационной инфу-

зионно-трансфузионной терапии начинается с расчета минимально допустимой кровопотери, при которой не требуется гемотрансфузия.

Известно, что значения гематокрита для крови, взятой из разных органов, а также для венозной, артериальной и капиллярной крови, различны. В клинике гематокрит определяют в крови, взятой из локтевой вены. В лабораторных условиях *in vitro* гематокрит снижается после центрифугирования крови или при использовании гематологического автомата.

С повышением температуры вязкость ньютоновской жидкости уменьшается, при понижении температуры - увеличивается. Вязкость крови, как неньютоновской жидкости, не находится в прямой пропорциональной зависимости от температуры. Существенную роль при этом играет скорость сдвига. Так, при скоростях сдвига 1-100/сек изменения температуры влияют на агрегацию эритроцитов и вызывают другие изменения в структуре крови. Поэтому температурные изменения вязкости при патологических процессах отличаются большой сложностью.

Литература

1. Бломбек М. Нарушения свертывания крови. Практические рекомендации по диагностике и лечению. Медицинская литература. 2014. 208 с.
2. Бурячковская Л. И., Ломакин Н. В., Сумароков А. Б., Широков Е. А. Алгоритмы и шкалы риска тромбоза и кровотечения в кардиологии и неврологии. Студия Колор-Бонс. 2018. 102 с.
3. Давыдкин И. Л., Момот А. П., Зозуля Н.И, Ройтман Е.В. Основы клинической гемостазиологии и гемореологии. Самара: ООО ИПК «Самарская Губерния», 2017. 484с.
4. Дементьева И.И., Чарная М.А., Морозов Ю.А. Патология системы гемостаза. М., ГЕОТАР-Медиа. 2011. 283 с.
5. Мамаев А.Н. Практическая гемостазиология. Изд. Практическая медицина. 2014. 233 с.
6. Пустовалова Л.Н. О чем говорят анализы? Клинико-лабораторная диагностика в нефрологии. Изд. Феникс. 2016. 78 с.
7. Ройтман Е.В., Н. Ю. Левшин. Тромбоз и гемостаз. Шкалы и алгоритмы. 2016. 112 с.
8. Стуклов Н.И. Физиология и патология системы гемостаза. ГЭОТАР-Медиа. 2016. 112 с.
9. Синьков С.В., Заболотских И.В. Диагностика и коррекция расстройств системы гемостаза. Изд. Практическая медицина. 2017. 336 с.