

Рис. 9.2. Профиль осредненных скоростей при ламинарном (а) и турбулентном (б) течениях

Когда значение  $Re$  меньше критического  $Re_{kp} \approx 2300$ , имеет место ламинарное течение жидкости, если  $Re > Re_{kp}$ , то течение становится турбулентным. Как правило, движение крови по сосудам является ламинарным. Однако в ряде случаев возможно возникновение турбулентности. Турбулентное движение крови в аорте может быть вызвано прежде всего турбулентностью кровотока у входа в нее: вихри потока уже изначально существуют, когда кровь выталкивается из желудочка в аорту, что хорошо наблюдается при доплер-кардиографии. У мест разветвления сосудов, а также при возрастании скорости кровотока (например, при мышечной работе) течение может стать турбулентным и в артериях. Турбулентное течение может возникнуть в сосуде в области его локального сужения, например, при образовании тромба.

Турбулентное течение связано с дополнительной затратой энергии при движении жидкости, поэтому в кровеносной системе это может привести к дополнительной нагрузке на сердце. Шум, возникающий при турбулентном течении крови, может быть использован для диагностики заболеваний. При поражении клапанов сердца возникают так называемые сердечные шумы, вызванные турбулентным движением крови.

### § 35. Основные законы гемодинамики

**Гемодинамика** – один из разделов биомеханики, изучающий законы движения крови по кровеносным сосудам. Задача гемодинамики – установить взаимосвязь между основными гемодинамическими показателями, а также их зависимость от физических параметров крови и кровеносных сосудов.

К основным гемодинамическим показателям относятся давление и скорость кровотока.

*Давление* – это сила, действующая со стороны крови на сосуды, приходящаяся на единицу площади :  $P = F / S$ . Различают объемную и линейную скорости кровотока. *Объемной скоростью*  $Q$  называют величину, численно равную объему жидкости, перетекающему в единицу времени через данное сечение трубы:

$$Q = \frac{V}{t},$$

единица измерения ( $\text{м}^3 / \text{с}$ ).

*Линейная скорость* представляет путь, проходимый частицами крови в единицу времени:

$$V = l / t,$$

единица измерения ( $\text{м} / \text{с}$ ). Поскольку линейная скорость неодинакова по сечению трубы, то в дальнейшем речь будет идти только о линейной скорости, средней по сечению.

Линейная и объемная скорости связаны простым соотношением  $Q = VS$ , где  $S$  – площадь поперечного сечения потока жидкости.

Так как жидкость несжимаема (то есть плотность ее всюду одинакова), то через любое сечение трубы и в единицу времени протекают одинаковые объемы жидкости:

$$Q = VS = \text{const.} \quad (9.4)$$

Это называется условием неразрывности струи. Оно вытекает из закона сохранения массы для несжимаемой жидкости. Уравнение неразрывности струи относится в равной мере к движению всякой жидкости, в том числе и вязкой. При описании физических законов течения крови по сосудам вводится допущение, что количество циркулирующей крови в организме постоянно. Отсюда следует, что объемная скорость кровотока в любом сечении сосудистой системы также постоянна:  $Q = \text{const.}$

В реальных жидкостях (вязких) по мере движения их по трубе потенциальная энергия расходуется на работу по преодолению внутреннего трения, поэтому давление жидкости вдоль трубы падает. Для стационарного ламинарного течения реальной жидкости в цилиндрической трубе постоянного сечения справедлива формула (закон) Гагена–Пуазейля:

$$Q = \frac{\pi R^4}{8\eta} \cdot \frac{\Delta P}{l}, \quad (9.5)$$

где  $\Delta P = P_1 - P_2$  – падение давления, то есть разность давлений у входа в трубу  $P_1$  и на выходе из нее  $P_2$  на расстоянии  $l$  (рис. 9.3). Данная закономерность была эмпирически установлена учеными Гагеном (1839 г.) и Пуазейлем (1840 г.) независимо друг от друга и часто носит название закон Пуазейля.

Величина

$$W = \frac{8\eta l}{\pi R^4} \quad (9.6)$$

называется гидравлическим сопротивлением сосуда. Выражение (9.5) можно представить как

$$\Delta P = Qw. \quad (9.5, a)$$

Из закона Пуазейля (9.5) следует, что падение давления крови в сосудах зависит от объемной скорости кровотока и в сильной степени от радиуса сосуда. Так, уменьшение радиуса на 20 % приводит к увеличению падения давления более чем в 2 раза. Даже небольшие изменения просветов кровеносных сосудов сильно сказываются на падении давления. Не случайно основные фармакологические средства нормализации давления направлены прежде всего на изменение просвета сосудов.

Границы применимости закона Пуазейля: 1) ламинарное течение; 2) гомогенная жидкость; 3) прямые жесткие трубы; 4) удаленное расстояние от источников возмущений (от входа, изгибов, сужений).

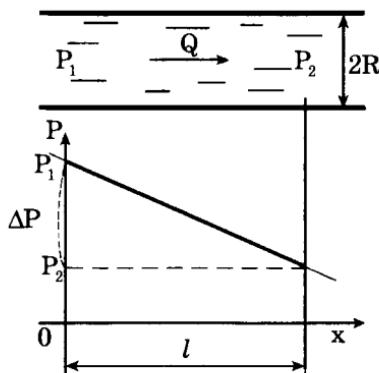


Рис. 9.3. Падение давления при течении жидкости по трубке

Рассмотрим гемодинамические показатели в разных частях сосудистой системы.

### *Гидравлическое сопротивление.*

Гидравлическое сопротивление  $w$  в значительной степени зависит от радиуса сосуда (9.6). Отношения радиусов для различных участков сосудистого русла:

$$R_{\text{аорт}} : R_{\text{ап}} : R_{\text{кап}} \approx 3000 : 500 : 1.$$

Поскольку гидравлическое сопротивление в сильной степени зависит от радиуса сосуда  $w \sim \frac{1}{R^4}$ , то можно записать соотношение:

$$w_{\text{кап}} > w_{\text{ап}} > w_{\text{аорт}}.$$

### *Линейная скорость кровотока.*

Рассмотрим закон неразрывности (9.4). Площадь суммарного просвета всех капилляров в 500 – 600 раз больше поперечного сечения аорты. Это означает, что  $V_{\text{кап}} \approx 1/500 V_{\text{аорт}}$ . Именно в капиллярной сети при медленной скорости движения происходит обмен веществ между кровью и тканями.

На рис. 9.4 приведена кривая распределения линейных скоростей вдоль сосудистой системы.



**Рис. 9.4.** Линейная скорость в различных участках сосудистого русла

### *Распределение среднего давления.*

При сокращении сердца давление крови в аорте испытывает колебания. Сейчас будет речь идти о среднем давлении за период. Среднее давление может быть оценено по формуле

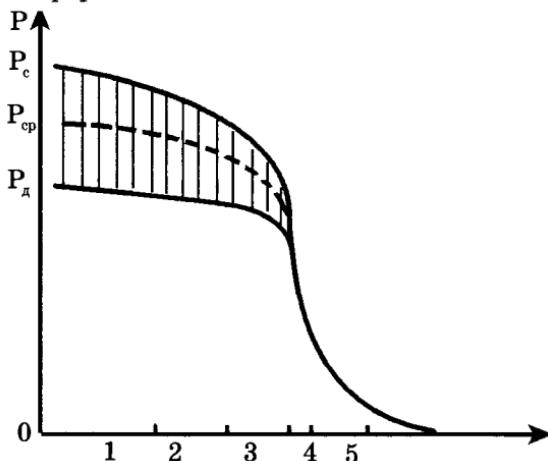
$$P_{\text{ср}} \approx P_{\text{д}} + \frac{P_{\text{с}} - P_{\text{д}}}{3}.$$

Падение среднего давления крови вдоль сосудов может быть описано законом Пуазейля (9.5, а). Сердце выбрасывает кровь под средним давлением  $P_{ср}$ . По мере продвижения крови по сосудам среднее давление падает. Поскольку  $Q = \text{const}$ , а  $w_{\text{кап}} > w_{\text{арт}} > w_{\text{аорт}}$ , то для средних значений давлений:

$$\Delta P_{\text{кап}} > \Delta P_{\text{артерий}} > \Delta P_{\text{аорт}}.$$

В крупных сосудах среднее давление падает всего на 15 %, а в мелких на 85 %. Это означает, что большая часть энергии, затрачиваемой левым желудочком сердца на изгнание крови, расходуется на ее течение по мелким сосудам.

Распределение давления (превышение над атмосферным) в различных отделах сосудистого русла представлено на рис. 9.5. Отрицательное значение давления означает, что оно несколько ниже атмосферного.



**Рис. 9.5.** Распределение давления (превышение над атмосферным) в различных участках сосудистого русла (штриховкой обозначена область колебания давления, пунктиром – среднее давление);  
1 – давление в аорте, 2 – в крупных артериях, 3 – в мелких артериях,  
4 – в артериолах, 5 – в капиллярах

### § 36. Биофизические функции элементов сердечно-сосудистой системы

В 1628 г. английский врач В. Гарвей предложил модель сосудистой системы, где сердце служило насосом, прокачивающим кровь по сосудам. Он подсчитал, что масса крови, выбра-