

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ НА ПАРАМЕТРЫ КРОВЕНОСНОЙ СИСТЕМЫ

**Цель работы** - изучить влияние силы гравитации (тяжести) на распределение крови и давления по тканям человеческого организма.

**Задание к работе** - 1) ознакомиться с описанием работы с программой; 2) просчитать программу согласно исходным данным; 3) выполнить обработку результатов и оформить отчет; 4) выполнить анализ полученных данных о влиянии силы гравитации.

#### 1.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

##### 1.1.1 ОБЩЕЕ УРАВНЕНИЕ БЕРНУЛЛИ ДЛЯ РАСЧЕТА БКК

Особенностью настоящей работы является разработка уточненного алгоритма расчета БКК с учетом морфологических свойств основных его элементов: аорты, артерий, артериол, капилляров. Схема составленного в итоге уравнения Бернулли представлена в табл. 1. Оно состоит из трех характерных частей: источника давления, сопротивления участков БКК, внешних физических факторов.

Таблица 1

| Ис-<br>точник | Сопротивление участков       |                                |                    |            | Внешние факторы           |                                 |                                                |
|---------------|------------------------------|--------------------------------|--------------------|------------|---------------------------|---------------------------------|------------------------------------------------|
|               | аорта+<br>арте-<br>рии       | арте-<br>риолы                 | капил-<br>ляры     | ве-<br>ны  | сила<br>тя-<br>жес-<br>ти | линей-<br>ное<br>уско-<br>рение | ком-<br>прес-<br>сион-<br>ное<br>давле-<br>ние |
| $P_a$<br>=    | $\xi(\text{var})\rho V^2/2+$ | $\zeta(\text{var})\rho W^2/2+$ | $k(\text{var}) Q+$ | $P_v$<br>+ | $\rho gh$<br>+            | $\Delta P_{\text{уск}}$<br>+    | $\Delta P_{\text{комп}}$                       |

**Источник давления.** Представлен левой частью уравнения и описывает потенциальную энергию давления в аорте. С физической точки зрения это систолическое давление, создаваемое на входе аорты в момент открытия левого желудочка сердца. В настоящей модели расчета (квазистационарной) это полное давление, зависящее от возраста и пола. В реальности оно распадается на несколько компонентов: статического давления (к нему относится диастолическое), кинетической энергии поступательного движения, а также двух динамических аккумулирующих механизмов, формирующих разницу между диастолическим и систолическим давлениями. Первый механизм: упругое расширение стенок ААУ, создающее явление пульсовой волны. Второй механизм: создание вращающегося тока крови в ААУ. Оба механизма запасают энергию на участке систолы и отдают ее на участке диастолы. Расчет и исследование данных механизмов требует решения дифференциального уравнения Бернулли и в настоящей работе не рассматривается.

**Сопротивление участков.** Представлено первыми четырьмя слагаемыми правой части, которые описывают потери давления в элементах большого круга кровообращения.

**Сопротивление аорто-артериального участка БКК** (первое слагаемое). По своему смыслу, это совокупность потерь давления на ААУ, состоящая из трех независимых слагаемых: местных сопротивлений на ветвление ААУ, потерь давления на трение о стенки артерий, потерь

давления на вращение крови. Данная совокупность потерь включена в коэффициент  $\xi(\text{var})$  перед скоростным напором  $\rho V^2/2$  в *артериях*, который в итоге зависит от морфологических особенностей ААУ.

**Сопротивление участка артериол БКК** (второе слагаемое). В данном случае, это потери давления, вызванные распределением крови на артериолы, местными потерями на пространственное искривление каналов артериол и потерями на трение о стенки. Описываются коэффициентом  $\zeta(\text{var})$  перед скоростным напором  $\rho W^2/2$  в *артериолах*, и зависят, таким образом, от морфологических особенностей артериол и их состояния: спазма – расширения.

**Сопротивление в капиллярах тканей** (третье слагаемое). Представлено в виде произведения коэффициента потерь давления  $k(\text{var})$ , вызванных силами вязкостного трения о стенки *капилляров*, и совокупного расхода  $Q$  на соответствующую ткань. Зависит от морфологических особенностей капилляров и их состояния: спазма – расширения.

**Сопротивление венозного участка БКК** (четвертое слагаемое). Фактически это фиксированные значения остаточного давления в низконапорной части БКК, необходимые для задания минимального тока крови из ткани в правое предсердие.

Таким образом, три первых слагаемых уравнения имеют переменные коэффициенты, причем два первых  $\xi(\text{var})$  и  $\zeta(\text{var})$  – перед нелинейными переменными ( $V^2$  и  $W^2$ ), а третий  $k(\text{var})$  – перед линейной переменной ( $Q$  – пропорционально  $V$ ).

**Внешние факторы.** В них объединены последние три слагаемые правой части уравнения, которые описывают действие внешних физических факторов, оказывающих влияние на параметры кровеносной системы.

**Сила тяжести** (пятое слагаемое). Слагаемое описывает действие силы гравитации на организм (гидростатические потери, необходимые на преодоление высоты столба жидкости). Зависит от положений тела, определяется разницей вертикальных координат миокарда и ткани. Для тканей выше миокарда – дополнительные потери давления, ниже – наоборот, добавочный "подпор" давления. Важнейший фактор в задачах о невесомости и гиподинамии.

**Инерционные силы** (шестое слагаемое). Слагаемое описывает дополнительные инерционные потери, необходимые для преодоления силы инерции, действующей на кровь при ускорении организма. Зависит от величины ускорения и его направления по отношению к току крови. Если ускорение "тормозит" кровь – это дополнительное сопротивление в БКК, если "ускоряет" – наоборот, источник энергии, повышающий давление в ней. Инерционные силы – важнейший фактор в задачах о перегрузках, действующих на организм человека.

**Компрессионное давление** (седьмое слагаемое). Соответствует потерям давления на преодоление избыточного компрессионного (декомпрессионного) воздействия окружающей среды на ткань. Специфический внешний фактор, описывающий совокупность физических явлений, который условно можно разделить на две характерные группы. В случае "обжатия" тела давлением (ныряние под воду, действие противоперегрузочного костюма) соответствующие ткани испытывают явления: сжатие капилляров внешних тканей организма и создание в них "противодавления", зачастую большего систолического. В итоге, кровь из этих тканей "уходит" во внутренние слои организма. В случае "вакуумирования" (резкая разгерметизация, кессонная болезнь, действие вакуумирующего костюма) действуют противоположные явления, "откачивающие" кровь из внутренних тканей в поверхностные слои. В более общей постановке это полное давление окружающей среды, равное 101,325 кПа (760 мм.рт.ст), в которой сердце формирует нестационарные "избыточные" волны давления величиной 10...20 кПа (80...120 мм.рт.ст.)

### 1.1.2. РЕАКЦИИ НА ИЗМЕНЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕЛА ЧЕЛОВЕКА

Так как сила тяжести оказывает влияние на величины давления в сердечно-сосудистой системе, при перемене положения тела в ее регулирующих механизмах происходит серьезная перестройка.

Как показано на рис. 1, это приближение справедливо для индивидуума, находящегося в горизонтальном положении. У человека в вертикальном положении между сердцем и участками, которые расположены не на уровне сердца, существует дополнительный градиент. Это имеет наибольшее значение для голеней и стоп при вертикальном положении. Как показано на рис. 1, В, все величины давления в сосудах стопы могут увеличиться на 90 мм рт. ст. только за счет объема крови в артериях и венах, которые направляются к стопе и отходят от нее.

Обратите внимание при сравнении рис. 1, А и В, что вертикальное положение тела само по себе не изменяет кровоток в нижних конечностях, так как сила тяжести оказывает одинаковое действие на артериальное и венозное давление и тем самым не изменяет *артериовенозную разность давления* на любой высоте. В то же время существуют два важных непосредственных следствия повышения давления в сосудах нижних конечностей, которые показаны на рис. 1, В: (1) абсолютное увеличение венозного давления приводит к растяжению периферических вен и существенному увеличению периферического венозного объема и (2) абсолютное увеличение гидростатического давления в капиллярах вызывает существенное увеличение скорости транскапиллярной фильтрации.

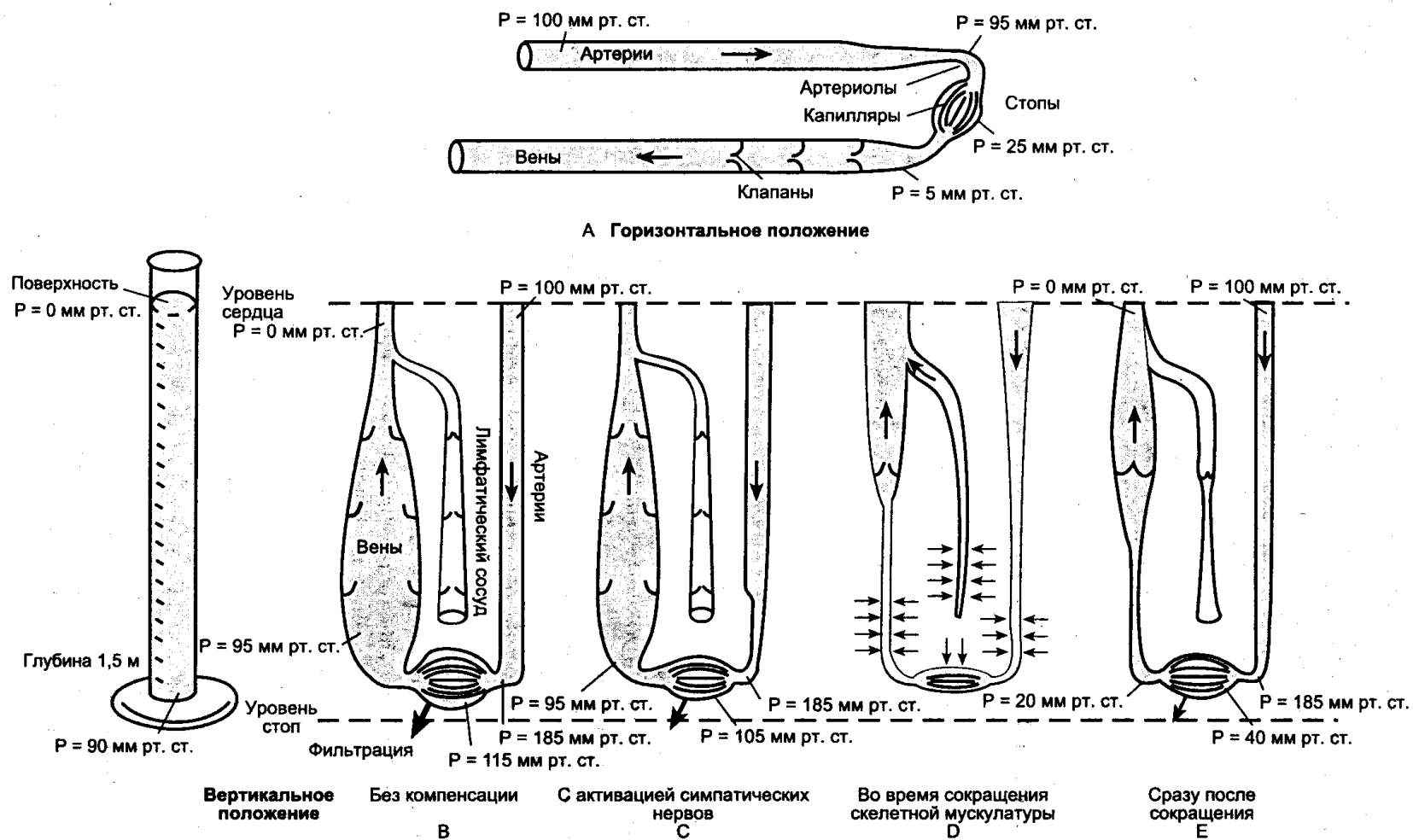


Рис. 1 Влияние силы тяжести на давление в сосудах (А и В) с компенсаторным эффектом активации симпатических нервов (С) и насоса скелетной мускулатуры (D и E)

По причинам, которые будут описаны позднее, при переходе из горизонтального в вертикальное положение происходит рефлекторная активация симпатических нервов. В то же время на рис. 1, С показано, что сужение сосудов в результате активации симпатических нервов оказывает только предельный эффект в снижении нежелательных воздействий силы тяжести на нижние конечности. Сужение артериол может привести к большему давлению на протяжении артериол, это лишь ограничено влияет на капиллярное давление, поскольку венозное давление остается исключительно высоким. Скорость фильтрации продолжает оставаться очень высокой. Фактически нормальные сердечно-сосудистые рефлекторные механизмы сами по себе не способны осуществить адаптацию к вертикальному положению без помощи *«насоса скелетной мускулатуры»*. Находящийся в вертикальном положении субъект без периодической сократительной деятельности скелетной мускулатуры в нижних конечностях потерял бы сознание минут через 10-20 из-за снижения мозгового кровотока, который возник бы в результате уменьшения центрального объема крови, ударного объема, минутного объема и артериального давления.

На рис. 1, О и Е показана эффективность насоса скелетной мускулатуры для предотвращения накопления крови в венозном пуле и образования отеков нижних конечностей в вертикальном положении тела. Сжатие сосудов при сокращении скелетных мышц изгоняет из нижних конечностей, как венозную кровь, так и лимфатическую жидкость (рис. 1, С). Сразу после сокращения скелетной мускулатуры как вены, так и лимфатические сосуды относительно пусты, поскольку их работающие только в одном направлении клапаны препятствуют обратному току уже изгнанной из них крови (рис. 1, Е). Наиболее важно, что объем столба венозной крови и лимфатической жидкости временно поддерживается закрытыми створками односторонних венозных клапанов. Соответственно, венозное давление быстро снижается сразу после сокращения скелетных мышц и поднимается только постепенно по мере того, как вены снова наполняются кровью из капилляров. Таким образом, давление в капиллярах и скорость транскапиллярной фильтрации жидкости существенно снижаются на какое-то время после сокращения скелетных мышц. Периодическое сокращение скелетных мышц может поддерживать среднее значение венозного давления на уровне, который лишь незначительно превышает норму. Это в сочетании с увеличением градиента давления на протяжении суженных артериол препятствует подъему капиллярного давления в нижних конечностях до непереносимого уровня. Транскапиллярная фильтрация жидкости в некоторой степени сохраняется, но увеличение потока лимфатической жидкости в результате деятельности насоса скелетной мускулатуры в норме оказывается достаточным, чтобы предотвратить образование выраженных отеков на стопах.

Для тех из нас, кто остается на Земле, интересно отметить, что многие из тех изменений, которые происходят в невесомости, сходны с изменениями, возникающими при длительном пребывании в постели. В этом случае воздействие гравитации на организм сведено к минимуму из-за пребывания в горизонтальном положении. Осуществляется переход крови из вен нижних конечностей в центральный венозный пул и включаются механизмы, направленные на уменьшение объема жидкости в организме. В результате уменьшения объема циркулирующей крови у таких индивидуумов повышается склонность к ортостатической гипотензии, что часто наблюдается у пациентов, которые начинают ходить после постельного режима.

## 1.2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

### 1.2.1 КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В настоящей работе производится расчет распределения расхода и давления в кровеносной системе при снижении силы гравитации от Земной до нуля. При этом моделируются следующие задачи:

Таблица 2

| Величина<br>g | Моделируемая физическая задача         |
|---------------|----------------------------------------|
| 1             | вертикальное положение тела на Земле   |
| 0,6           | вертикальное положение тела на Марсе   |
| 0,3           | вертикальное положение тела на Луне    |
| 0             | горизонтальное положение тела на Земле |

Изменение силы тяжести выполняется в пятом слагаемом уравнения Бернулли (табл. 1.) путем изменения коэффициента перед g от 1 до 0. Слагаемое описывает действие силы гравитации на организм (гидростатические потери, необходимые на преодоление высоты столба жидкости). Зависит от положений тела, определяется разницей вертикальных координат миокарда и ткани. Для тканей выше миокарда – дополнительные потери давления, ниже – наоборот, добавочный "подпор" давления. Важнейший фактор в задачах о невесомости и гиподинамии.

Моделирование значения коэффициента перед g выполняется через 5 - 7 строки таблицы ввода параметров, используемых в программе:

```

-----
I 5 I      N_G1- nach-GRAVITATIA      I 10.00000 I
I 6 I      N_G2- kon- GRAVITATIA      I  1.00000 I
I 7 I      N_G3- shag- GRAVITATIA      I  -1.00000 I
-----

```

В строке 5 задается начальное значение счетчика коэффициента в цикле N\_G1, в строке 6 - конечное значение N\_G2, а в строке 7 - шаг цикла N\_G3. Значение счетчика N\_U соответствует силе гравитации следующим образом:

Таблица 3

| Значение счетчика N_G | Значение силы гравитации | Область применения |
|-----------------------|--------------------------|--------------------|
| 10                    | 1                        | Земля              |
| 5                     | 0,5                      | Марс-Луна          |
| 0                     | 0                        | невесомость        |

### 1.2.2. АЛГОРИТМ ЗАМЕНЫ ПАРАМЕТРОВ

Для замены параметра необходимо набрать соответствующую строку параметров цикла и вставить значение счетчиков коэффициента N\_G согласно варианту задания:

**Шаг 1. Вызов заменяемой строки.** На первом шаге в ответ на запрос набираем номер строки - 5, после нажатия **enter** на экране появляется следующее сообщение:

```

I 5 I      N_G1- nach-GRAVITATIA      I 10.00000 I

```

**Шаг 2. Ввод численного значения параметра.** Курсор будет стоять вначале поля числа, справа от него будет стоять предыдущее значение параметра. Для замены параметра необходимо набрать соответствующее варианту значение параметра (например, 0.), поставить после числа точку и нажать **enter**.

**Шаг 3. Замена значения остальных строк.** Далее осуществляется повторная выдача на дисплей параметров кровеносной системы для контроля за правильностью ввода исходных данных. Для смены параметров строк 6 и 7 необходимо воспользоваться аналогичным алгоритмом.

**Шаг 4. Запуск программы на счет и выход из программы.** После окончания ввода данных необходимо запустить программу на счет: набрать цифру «0». После завершения расчетов на мониторе вновь появится заставка программы: если расчеты закончены – набирается «0».

### 1.2.3. ОФОРМЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА

После завершения работы программы необходимо построить три графика распределения крови и давления по тканям кровеносной системы. Схема и порядок оформления даны в Приложении 1.

### 1.2.4. СХЕМА АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ результатов представляет собой краткую качественную и количественную характеристику полученных табличных и графических зависимостей. В случае моделирования физических процессов необходима их физическая интерпретация.

**Распределения крови по тканям.** В таблице результатов и на графике в случае  $g=1$  приведено нормальное распределение крови по тканям для Земли в случае вертикального положения. В случае  $g=0$  (горизонтальное положение на Земле или невесомость) наблюдается самое крайнее отклонение параметров от нормы.

Для количественной оценки степени вредности фактора требуется оценить отклонение по следующей логике:

$$\Delta MOK_{\text{ткань}} = \frac{MOK_{\text{норма}}^{\text{Земля}} - MOK_{\text{отклонение}}^{\text{невесомость, Луна, Марс}}}{MOK_{\text{норма}}^{\text{Земля}}} * 100\%$$

Распределение крови зависит от расположения тканей относительно миокарда (сердца). Максимальное отклонение расхода крови от нормы наблюдается для двух наиболее удаленных от сердца тканей:

- выше миокарда - голова;
- ниже миокарда - ноги.

Отклонения МОК от нормы на Земле по предложенной схеме оцениваются для этих тканей в случае невесомости (горизонтальное положение), попадания на Луну и на Марс. Полученные значения сравниваются с биологическими порогами и делается качественный вывод о степени опасности изменений расхода крови по тканям в зависимости от изменения величины силы гравитации.

**Остаточное давление в капиллярах.** В таблице результатов и на графике в случае  $g=1$  приведено нормальное распределение давления в капиллярах тканей для Земли в случае вертикального положения. В случае  $g=0$  (горизонтальное положение на Земле или невесомость) наблюдается самое крайнее отклонение параметров от нормы.

Количественная оценка степени вредности фактора проводится по схеме приведенной выше: считается отклонение давления  $\Delta P_{\text{ткань}}$  для головы и ног.

Отклонения давления от нормы по предложенной схеме оцениваются для этих тканей в случае невесомости (горизонтальное положение), попадания на Луну и на Марс, а затем сравниваются с биологическими порогами.

### 1.3. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ К РАБОТЕ

Таблица 4

| Варианты заданий |                  |         |                 |                 |                 |
|------------------|------------------|---------|-----------------|-----------------|-----------------|
| №                | Пол              | Возраст | N_G1 (строка 5) | N_G2 (строка 6) | N_G3 (строка 7) |
| 1                | Мужской организм | 10      | 10              | 0               | -1              |
| 2                | Мужской организм | 20      | 10              | 0               | -1              |
| 3                | Мужской организм | 30      | 10              | 0               | -1              |
| 4                | Мужской организм | 40      | 10              | 0               | -1              |
| 5                | Мужской организм | 50      | 10              | 0               | -1              |
| 6                | Женский организм | 10      | 0               | 10              | +1              |
| 7                | Женский организм | 20      | 0               | 10              | +1              |
| 8                | Женский организм | 30      | 0               | 10              | +1              |
| 9                | Женский организм | 40      | 0               | 10              | +1              |
| 10               | Женский организм | 50      | 0               | 10              | +1              |