



2. Моделирование конвективного переноса с током теплоносителя. Расчет гидравлических характеристик в контуре

Одним из важнейших механизмов работы системы термостабилизации человека является гемодинамический механизм. С его помощью регулируется количество тепла переносимое кровью между «ядром» и «оболочкой». Для того чтобы учесть механизм конвективного переноса тепла с током крови, возникла необходимость разработать методику расчета совместной работы системы термостабилизации и кровеносной системы человека.

При охлаждении кожа, в капиллярах которой находится до 50 % всей крови, является наиболее важным рефлекторным органом термических раздражении. Под действием холода капилляры сужаются, кровь из них выдавливается в «ядро», температура кожи уменьшается и теплопроводность поверхностных тканей тела снижается. Внутренние органы и мозг оказываются окруженными достаточно эффективным естественным теплоизоляционным слоем подкожных капилляров и жира. В итоге работа гемодинамического механизма заключается в регуляции теплоотдачи путем изменения соотношения объемов «ядра» и «оболочки» в теле человека. При охлаждении тела объем «оболочки» уменьшается, а «ядра» – увеличивается. С точки зрения теории теплообмена данный механизм характеризует первый режим охлаждения (начальную стадию), характерной особенностью которого является распространение температурных возмущений в пространстве и захват все новых слоев тела. Скорость изменения температуры в отдельных точках при этом сильно зависит от начального состояния, которое может быть различным.

Таким образом, в системе термостабилизации кровеносная система выполняет функцию распределения теплоносителя (крови) между расчетными элементами (органы) и слоями (ткани) и характеризует начальную стадию охлаждения. В расчетных элементах в зависимости от параметров внешней среды и режимов работы производится нагрев либо охлаждение теплоносителя. Вторая группа тепловых процессов в теплоносителе происходит в результате смешения теплоносителей разной температуры на выходе из расчетных элементов. Таким образом, важной особенностью СТС является наличие нескольких типов расчетных элементов, связанных между собой сложной последовательно-параллельной гидравлической системой, обладающей переменными теплогидравлическими свойствами.

2.1. Схема совместной работы системы термостабилизации и гидравлической системы

Гидравлическая система разделена на два характерных контура: первый – большой круг кровообращения (БКК); второй – малый круг (МКК). На входе первого контура (рис. 2.1, I) теплоноситель имеет одинаковую

температуру. В первом контуре параллельно включены семь расчетных элементов (потребителей), причем пять из них производят нагрев или охлаждение теплоносителя за счет теплообмена с окружающей средой, а два – за счет внутренних источников или стоков тепла в зависимости от режимов работы СТС. В итоге теплоносители на выходе из расчетных элементов имеют разные температуры. На выходе первого контура теплоносители смешиваются. В результате работы системы смесительных теплообменников температура теплоносителя изменяется по сравнению с температурой на входе в первый контур. Затем теплоноситель поступает во второй контур (рис. 2.1, II), где находится один элемент (легкие) в котором происходит дополнительное изменение температуры за счет теплообмена с окружающей средой. После этого теплоноситель возвращается в первый контур.

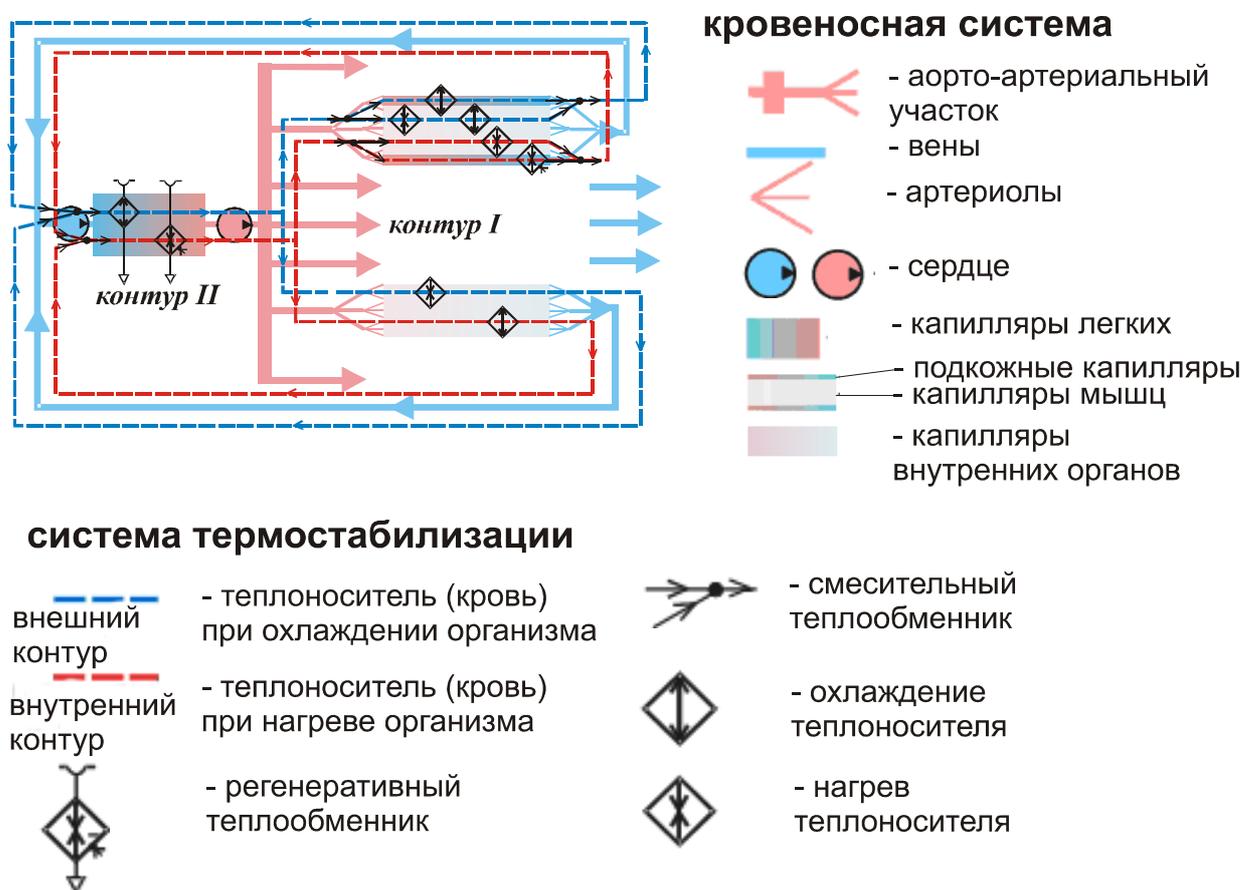


Рис. 2.1. Схема совместной работы гидросистемы и системы термостабилизации



Типы расчетных элементов

Схема совместной работы КС и СТС включает в себя три характерные группы расчетных элементов: внешние элементы, имеющие теплообмен с окружающей средой (голова, руки, ноги, мышцы верхней и нижней части туловища); внутренние элементы, не имеющие теплообмена с окружающей средой (миокард, головной мозг и другие внутренние органы); смешанные элементы (легкие), которые с одной стороны являются внутренним органом, а с другой – имеют теплообмен с окружающей средой. Внешние элементы состоят из двух слоев – слоя теплоизоляции (подкожные капилляры СТС) и среднего слоя «ядра» (мышцы), а внутренние элементы являются внутренним слоем «ядра» и не имеют непосредственного слоя теплоизоляции. Теплоизоляцией для внутренних элементов служит слой мышц и слой подкожных капилляров верхней и нижней частей туловища. Таким образом, тело условно делится на две части: «оболочку» и «ядро». «Оболочка» – покровные ткани тела: кожа, часть скелетной мускулатуры, составляющие около 50 % тела. «Ядро» – внутренние органы грудной и брюшной полостей, глубокие мышцы и головной мозг, функционирующие при определенной температуре (36,8°C).

Режимы совместной работы

Существует два вида теплового воздействия окружающей среды: гипотермия (охлаждение) характеризуется тем, что температура окружающей среды меньше температуры тела ($t_{\text{окр_среды}} < t_{\text{средн_тела}}$), гипертермия (нагрев) – температура среды больше температуры тела ($t_{\text{окр_среды}} > t_{\text{средн_тела}}$). В зависимости от условий среды организм включает механизмы системы терморегуляции, направленные на поддержание комфортной температуры тела в течение как можно большего периода времени. В частности при гипотермии СТС компенсирует охлаждение за счет внутренних тепловыделений и перераспределения тепла между расчетными элементами и слоями за счет конвективного переноса тепла с током теплоносителя. В случае гипертермии главным компенсирующим механизмом является процесс испарения с поверхности «оболочки». Функцией конвективного переноса тепла теплоносителем является отвод тепла в «оболочку». В итоге, теплоноситель охлаждается за счет испарения и возвращается в «ядро». Таким образом, можно сказать, что СТС может работать как на охлаждение, так и на нагрев в зависимости от условий окружающей среды (аналогично сплит-системам в системах кондиционирования воздуха).

Гипотермия. На входе первого контура (рис. 2.1, I) теплоноситель имеет одинаковую температуру. В первом контуре пять расчетных элементов (голова, руки, ноги, мышцы верхней и нижней части туловища) являются двухслойными, имеют теплообмен с окружающей средой и под воздействием температуры окружающей среды постепенно остывают за счет теплоотдачи.



Компенсирющие механизмы СТС (конвективный перенос тепла с током крови и внутренние источники тепла) направлены на подогрев элементов. На входе в расчетный элемент теплоноситель условно делится на две части: одна проходит через слой теплоизоляции и осуществляет частичный подогрев слоя, вторая – через слой мышечной ткани, где наряду с подогревом от теплоносителя происходит дополнительный подогрев элемента за счет внутренних тепловыделений. На выходе из расчетного элемента теплоносители смешиваются и поступают в линию слива. Два расчетных элемента (внутренности и сердце) не имеют теплообмена с окружающей средой и состоят из одного слоя. Во внутренностях теплоноситель подогревается за счет метаболических процессов (внутренние тепловыделения) и с более высокой температурой поступает в линию слива. В итоге в линии слива происходит смешение теплоносителей, охлажденных в одних элементах и подогретых в других, и со средней температурой теплоноситель поступает во второй контур. Во втором контуре в легких за счет теплообмена с окружающей средой происходит частичное охлаждение теплоносителя, после чего он поступает на вход первого контура. Особое место в данной системе занимает сердце. Работая в качестве насосов, левый и правый желудочки производят перемешивание теплоносителя и выравнивание его температуры между первым и вторым контуром. Кроме того, за счет работы мышцы миокарда происходит частичная передача тепла теплоносителю.

Гипертермия. Расчетные элементы, которые имеют теплообмен с окружающей средой, под воздействием температуры постепенно нагреваются. Компенсирющие механизмы СТС (конвективный перенос тепла с током крови и испарительное охлаждение) направлены на сброс тепла в окружающую среду. Основная часть тепла за счет процесса испарения с поверхности слоя теплоизоляции сразу же сбрасывается в окружающую среду. Другая часть тепла передается теплоносителю в мышечном слое и сбрасывается в линию слива. В расчетных элементах, не имеющих теплообмена с окружающей средой, происходит частичное охлаждение теплоносителя за счет передачи тепла внутренним слоям с меньшей температурой. Во втором контуре в легких за счет теплообмена с окружающей средой происходит испарительное охлаждение и одновременно частичный нагрев теплоносителя, после чего он поступает на вход первого контура. Процессы смешения теплоносителей протекают по схеме, аналогичной гипотермии.

2.2. Методика расчета гидравлических характеристик в контуре теплоносителя

Методика расчета гидравлических характеристик в контуре теплоносителя состоит из трех этапов: расчет сопротивления участков контура (сосудистого русла), расчет перепадов давлений в контуре и расчет распределения теплоносителя между расчетными элементами и слоями.

Расчет сопротивления участков гидравлического контура

С точки зрения гидравлики сосудистое русло имеет несколько характерных зон кровотока (рис. 2.2, табл. 2.1, рис. П.1.1.), в каждой из которых имеются свои законы создания и потребления гидравлической энергии [90, 102, 108].

Для расчета коэффициентов сопротивления участков сосудистого русла были разработаны методики расчета отдельно для каждого участка. В них учитываются геометрические размеры и гидравлические характеристики контура: объемный расход теплоносителя, давление на входе в систему, вид, диаметры, длины и количество трубопроводов гидравлической сети, и скорость течения теплоносителя. Трубопроводы, в зависимости от функций, расположения в сети и размеров, подразделяются на следующие виды: аорта, артерии, артериолы, капилляры. Схема расчетных участков контура учитывает пространственное положение трубопроводов, схему делений и ответвлений, а также протяженность участков (рис. 2.3).

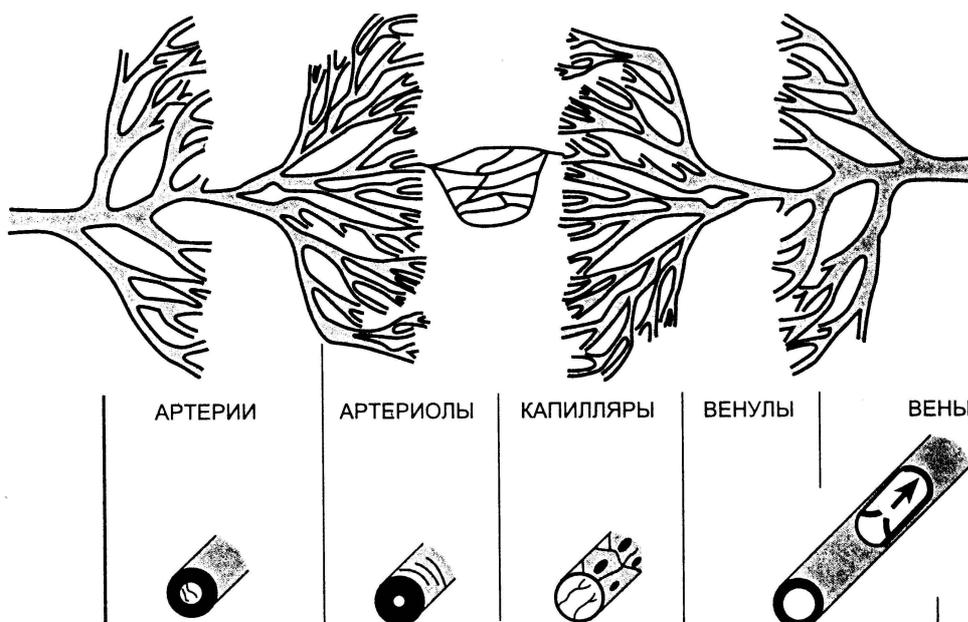


Рис. 2.2. Структура периферической сосудистой системы

Таблица 2.1

Параметры сосудов кровеносной системы

	Аорта	Артерии	Артериолы	Капилляры	Венулы	Вены	Полые вены
Внутренний диаметр	2,5 см	0,4 см	30 мкм	5 мкм	70 мкм	0,5 см	3 см
Толщина стенки	2 мм	1 мм	20 мкм	1 мкм	2 мкм	0,5 мм	1,5 мм
Количество	1	160	$5 \cdot 10^7$	10^{10}	10^8	200	2
Общее поперечное сечение, см²	4,5	20	400	4500	4000	40	18

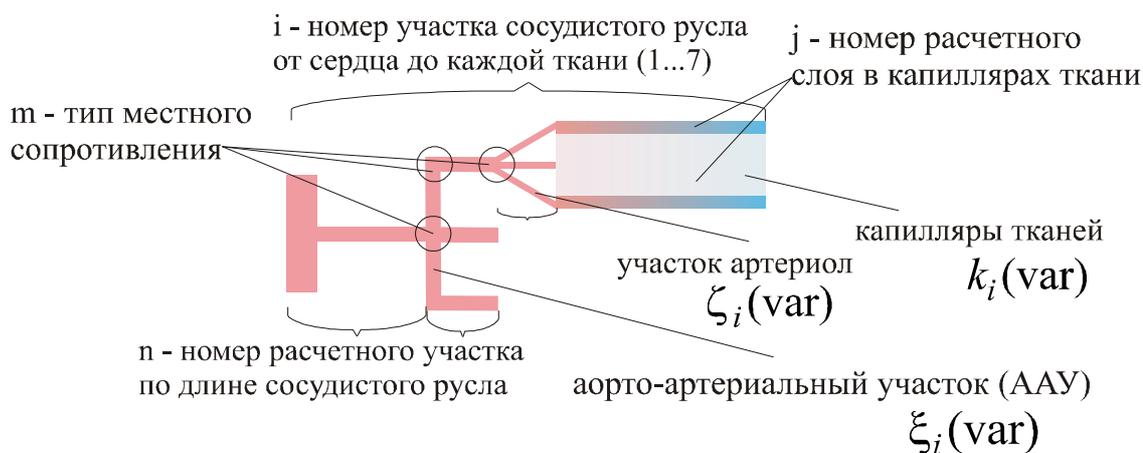


Рис. 2.3. Схема расчетных участков сосудистого русла

Расчет коэффициента сопротивления капиллярного участка $k(\text{var})$.

Капилляры представляют собой тончайшие сосуды, диаметр которых равен 5...7 мкм (соответствует размеру эритроцита), а длина 0,5 – 1,1 мм. Общее количество капилляров огромно. Суммарная длина всех капилляров тела человека составляет около 100 000 км. Скорость кровотока в капиллярах невелика и составляет 0,5 – 1 мм/с. Таким образом, каждая частица крови находится в капилляре примерно 1 с. Капилляры пролегают в межклеточных пространствах, тесно примыкая к клеткам органов и тканей организма [125, 127].



Продвижение крови в капиллярах обеспечивается как за счет капиллярного эффекта со смачиваемыми стенками малого диаметра, так и посредством импульсного сжатия стенок капилляров мышечными волокнами. Французский физик Ж. Пуазейль (1799-1869) выполнил эксперименты с потоком жидкости через маленькие стеклянные капиллярные трубочки и установил, что сопротивление потоку через цилиндрическую трубку зависит от нескольких факторов, в том числе от радиуса, длины трубки и вязкости жидкости, протекающей по трубке. Эти факторы определяют сопротивление току жидкости в соответствии со следующим уравнением:

$$k = \frac{8L\eta}{\pi r^4} \quad (2.1)$$

где k – коэффициент сопротивления, r – внутренний радиус трубки, L – длина трубки, η – динамическая вязкость жидкости.

Внутренний радиус трубки в данном уравнении возведен в четвертую степень. Таким образом, даже небольшие изменения величины внутреннего радиуса трубки будут оказывать сопротивление потоку жидкости.

Для расчета коэффициента сопротивления сети капилляров отдельного элемента уравнение (2.1) можно записать в следующем виде:

$$k_{i=1...7}(\text{var}) = \sum_{j=1}^3 \frac{128 \nu l_j^{\text{расч}}}{\pi g d_j^4} \Omega \quad (2.2)$$

где i – номер расчетного элемента (номер участка сосудистого русла от источника давления до каждого потребителя: 1 – голова; 2 – руки; 3 – мышцы верхней части туловища; 4 – миокард; 5 – внутренности; 6 – мышцы нижней части туловища; 7 – ноги.); j – номер слоя расчетного элемента (1 – внешний слой, 2 – средний слой «ядра», 3 – внутренний слой «ядра»); d – диаметр капилляра;

$\nu = \eta \cdot g$ – кинематическая вязкость жидкости; $\Omega = \frac{n_{\text{общ}}}{n_i} 0,375$ –

коэффициент, учитывающий падение сопротивления в капиллярах; $n_{\text{общ}}$ – количество капилляров; n_i количество капилляров в данном участке; $L_j^{\text{расч}} = L + L_{\text{экв}}$, $L_{\text{экв}}$ – эквивалентные длины капилляров при замене ими местных сопротивлений.

Реологические свойства крови. Кровь – неньютоновская (реологическая) жидкость. Она представляет собой суспензию эритроцитов (частицы диаметром 7 ... 8 мкм) в растворе плазмы (ньютоновская жидкость). Характерной особенностью эритроцитов служит их способность образовывать соединения (агрегаты), зависящие от диаметра сосудов и скорости течения в них. При этом происходит существенное изменение вязкости крови. Например, коэффициент вязкости крови в крупных сосудах составляет в норме $\eta_{\text{кр}} = 0,005$ Па·с, в то время как в мелких артериях и артериолах она составляет уже 2/3 от артериальной. Еще больший диапазон изменения вязкости при патологиях крови: если в норме $\eta_{\text{кр}} = (4,2 \dots 6)\eta_{\text{воды}}$, то при анемии – $\eta_{\text{кр ан}} = (2 \dots 3)\eta_{\text{воды}}$, а полицитемии – $\eta_{\text{кр пол}} = (15 \dots 20)\eta_{\text{воды}}$,



где $\eta_{\text{воды}} = 0,01$ Пуаз (1 Пуаз = 0,01 Па·с) – вязкость воды. Вязкость плазмы при этом практически не меняется и составляет $\eta_{\text{пл}} = 1,2 \eta_{\text{воды}}$ [20].

Расчет коэффициента сопротивления артериального участка $\zeta(\text{var})$. Артериолы представляют собой тонкие сосуды (диаметром 15 – 70 мкм). Стенка этих сосудов содержит толстый слой гладкой кольцевой мускулатуры, при сокращении которой просвет сосуда значительно уменьшается, что резко повышает сопротивление артериол. Наибольшим сопротивлением среди всех участков сосудистой системы обладают именно артериолы. Поэтому изменение их просвета является главным регулятором уровня общего артериального давления. Артериолы – «краны сердечно-сосудистой системы». Открытие этих «кранов» увеличивает отток крови в капилляры соответствующей области, улучшая местное кровообращение, а закрытие резко ухудшает кровообращение данной сосудистой зоны.

Регулирование расхода теплоносителя через артериолы производится за счет изменения их диаметров, кривизны и количества изгибов, которые приводят к резкому увеличению или снижению гидравлического сопротивления. Например, распрямление изгибов и уменьшение кривизны приводит к выпрямлению канала и резкому снижению его сопротивления. При увеличении сопротивления артериол происходит снижение расхода теплоносителя в элементах, стоящих за этими артериолами. При снижении сопротивления расход увеличивается.

Сопротивление участка артериол в общем виде (2.3) представляет собой сумму местных сопротивлений и сопротивления трения по длине расчетного участка.

$$\zeta_{i=1...7}(\text{var}) = \sum_{n=1}^{10} \left(\sum_{m=1}^8 \zeta_{nm}^{\text{местн}} + \lambda_n \frac{l_n}{d_n} \right), \quad (2.3)$$

где i – номер расчетного элемента (номер участка сосудистого русла от источника давления до каждого потребителя); n – номер расчетного участка по длине гидравлического контура (условно 10 участков), m – тип местного сопротивления (согласно справочнику И. Е. Идельчика [57]), $\zeta_{nm}^{\text{местн}}$ – коэффициент местного сопротивления, λ_n – коэффициент трения, l_n – длина участка, d_n – диаметр сосуда.

Точный расчет величины местных сопротивлений для отдельных артериол не выполнялся, т.к. артериолы обладают сложной трехмерной пространственной конфигурацией, изменяемой геометрией, зависящей от потребителя и режима работы. Вместе с тем они обладают большой удельной длиной $l/d \geq 50$, что позволяет рассчитывать коэффициент сопротивления артериол в конкретном элементе путем задания диапазонов l/d и суммарного коэффициента местного сопротивления и сопротивления трения.

Расчет коэффициента сопротивления аорто-артериального участка $\xi(\text{var})$. Аорта представляет собой вертикальную полую сужающуюся трубку. Верхнее входное отверстие расположено тангенциально, обеспечивая вращательно-поступательное движение крови,



вбрасываемой из левого желудочка. На протяжении от сердца до брюшного отдела от аорты отходят многочисленные ветви. Выходные отверстия в крупные артерии аналогично входному расположены тангенциально к стенкам аорты. Аорта работает в режиме гидроаккумулятора (рис. П.1.3). В пассивной фазе импульсная энергия крови, выбрасываемой из сердца, запасается в виде механической энергии упругого растяжения стенок аорты (частично и стенок отходящих крупных артерий), а также кинетической энергии вращательно-поступательного движения. Артерии представляют собой эластичные трубки диаметром около 0,4 см. Кровоток в артериях обеспечивается явлением *пульсовой волны*: распространение переднего фронта ударной волны путём локального изменения объёма эластичного сосуда за счёт одновременного изменения в нём давления и массы жидкости. Скорость распространения пульсовой волны составляет 6 ... 8 м/с, что в 20... 30 раз больше, чем скорость движения частиц самой крови. За время систолы – 0,3 с пульсовая волна успевает распространиться на расстояние 2 м, т.е. охватить все артерии.

В предсердиях и желудочках сердца, в артериях и венах большого и малого круга кровообращения существует вращательно-поступательное движение крови, которое было открыто и описано группой ученых: С.Н. Багаевым, В.Н. Захаровым и В.А. Орловым [11, 12]. Механизмами его возникновения являются спиральная упаковка мышечных волокон артерий (миоцитов) под углом 55° , тангенциальная и винтовая бифуркация артерий. Функциональная роль вращательной составляющей состоит в накоплении энергии на участке систолы, которая расходуется на проталкивание крови по артериям во время диастолы, когда клапаны сердца закрыты. В активной фазе стенки аорты сжимаются, а кинетическая энергия преобразуется в потенциальную энергию давления, что сопровождается выталкиванием крови в артерии большого круга кровообращения.

Расчет коэффициентов местного сопротивления. Местные потери полного давления возникают при местном нарушении нормального течения, отрыве потока от стенок, вихреобразовании и интенсивном турбулентном перемешивании потока в местах изменения конфигурации трубопровода или при встрече и обтекании препятствий (вход жидкости в трубопровод; расширение, сужение, изгиб и разветвление потока; протекание жидкости через отверстия, решетки, дроссельные устройства и т.п.). К местным потерям давления относятся также и потери динамического давления при выходе жидкости из сети в другой объем или окружающую среду. Таким образом, коэффициент местного сопротивления аорто-артериального участка (ААУ) является функцией геометрии и определяется согласно справочнику гидравлических сопротивлений И. Е. Идельчика [57].

$$\xi_{\text{местн}} = f(\text{геометрия ААУ}) \quad (2.4)$$

Для расчета коэффициента местного сопротивления аорто-артериального участка по длине гидравлического контура от источника давления до расчетного элемента учитывались типы и углы ответвлений,

рассчитывались отношения площадей поперечного сечения трубопроводов в местах ответвлений, отношения расходов теплоносителя и скоростей потока.

Расчет коэффициентов сопротивления трения. Гидравлическое трение называется вязкостью (как молекулярной, так и турбулентной) реальных жидкостей, возникающей при их движении, и является результатом обмена количеством движения между молекулами (при ламинарном течении) соседних слоев жидкости, движущихся с разными скоростями. Расчет коэффициента сопротивления трения $\xi_{\text{трени}}$ осуществляется по формуле

$$\xi_{\text{трени}} = \lambda(\text{Re}) \frac{l}{d}, \quad (2.5)$$

где λ – коэффициент трения, Re – число Рейнольдса, l – длина рассматриваемого участка, d – диаметр сосуда.

В данной работе основной ламинарный режим относится к малым значениям чисел Рейнольдса (до $\text{Re} \approx 2000$) и характеризуется тем, что шероховатость не оказывает никакого влияния на величину λ .

По закону Гагена-Пуазейля:
$$\lambda = \frac{\Delta P}{\left(\rho w_0^2 / 2\right) (l / D_0)} = \frac{64}{\text{Re}},$$

$$\text{Re} = \frac{w_0 D_0}{\nu}, \quad \text{Re} \leq 2000.$$

В итоге для ламинарного режима протекания потока ($100 \leq \text{Re} \leq 2000$):

$$\lambda = f(\text{Re}) = \frac{64}{\text{Re}}. \quad (2.6)$$

Расчет коэффициента потерь на вращение. Разработанная методика расчета вращательно-поступательного движения крови (подробно описана в [151]) позволила получить формулу для расчета потерь на вращение $\xi_{\text{вращ}}$:

$$\xi_{\text{вращ}} = \frac{\Delta P_{\text{вращ}}}{E_{\text{вращ}}} = \frac{2M\omega}{V_{\text{мок}} \rho (V_0 \text{tg}(\alpha))^2}, \quad (2.7)$$

где M – момент силы вращательного движения теплоносителя, ω – угловая скорость движения теплоносителя, $V_{\text{мок}}$ – объемный расход теплоносителя, ρ – плотность теплоносителя, V_0 – осевая скорость, α – угол закрутки теплоносителя.

Расчет суммарного коэффициента сопротивления. Переменный коэффициент $\xi(\text{var})_i$, характеризующий сопротивление аорто-артериального участка от источника давления до каждого элемента определяется как сумма вышеописанных коэффициентов:

$$\xi_{i=1 \dots 7}(\text{var}) = \sum_{n=1}^{10} \left(\sum_{m=1}^8 \xi_{nm}^{\text{местн}} + \xi_n^{\text{трени}} + \xi_n^{\text{вращ}} \right) \quad (2.8)$$

Расчетное уравнение Бернулли

Расчетное уравнение Бернулли для каждого потребителя (2.9) состоит из трех частей: источника давления, сопротивления участков БКК и внешних физических факторов.

$$P_a = \xi(\text{var})_i \frac{\rho V_i^2}{2} + \zeta(\text{var})_i \frac{\rho W_i^2}{2} + k(\text{var})_i G_i + \quad (2.9) \\ + P_{ei} + \rho g h_i + \Delta P_{\text{уск}i} + \Delta P_{\text{комп}i}$$

где: P_a – давление на входе в систему (систолическое), P_{vi} – давление на выходе (венозное), $\Delta P_{\text{уск}i}$ – потери на преодоление инерционных сил, $\Delta P_{\text{комп}i}$ – избыточное компрессионное давление, $\xi(\text{var})_i$ – коэффициент сопротивления аорто-артериального участка, $\zeta(\text{var})_i$ – коэффициент сопротивления участка артериол, $k(\text{var})_i$ – коэффициент сопротивления капиллярного участка i -ой части системы, G_i – объемный расход через i -ую часть системы, V_i – скорость теплоносителя в артериях, W_i – скорость теплоносителя в артериолах, ρ – плотность теплоносителя, g – ускорение свободного падения, h – разница между вертикальными координатами источника давления и потребителя, индексы $i = 1 \dots 7$ – группы потребителей: 1 – голова; 2 – руки; 3 – мышцы верхней части туловища; 4 – миокард; 5 – внутренности; 6 – мышцы нижней части туловища; 7 – ноги.

Источник давления представлен левой частью уравнения и описывает давление на входе в систему (потенциальная энергия давления в аорте – систолическое давление, создаваемое на входе аорты в момент открытия левого желудочка сердца). В настоящей модели расчете сердце рассматривается как насос переменной мощности. Нагнетаемое давление – это полное давление, которое зависит от возраста, пола, физической нагрузки и состояния организма. Давление «распадается» на несколько компонентов (рис. П.1.2): статическое давление (к нему относится диастолическое), кинетическая энергия поступательного движения, а также два динамических аккумулирующих механизма, формирующих разницу между диастолическим и систолическим давлениями. Первый механизм: упругое расширение стенок ААУ, создающее явление пульсовой волны. Расчет и исследование этого механизма требует решения дифференциального уравнения движения и в настоящей работе не описывается. Второй механизм: создание вращающегося тока крови в ААУ. Оба механизма запасают энергию на участке систолы и отдают ее на участке диастолы.

Сопротивление участков. Представлено первыми четырьмя слагаемыми правой части, которые описывают потери давления в расчетных элементах.

Сопротивление аорто-артериального участка (первое слагаемое). Это совокупность потерь давления на ААУ, состоящая из трех независимых слагаемых: местных сопротивлений на ветвление участка, потерь давления на трение о стенки, потерь давления на вращение теплоносителя. Данная совокупность потерь включена в коэффициент $\xi(\text{var})$ перед скоростным напором $\rho V^2/2$ в артериях, который зависит от геометрических размеров и гидравлических характеристик участка контура.

Сопротивление участка артериол (второе слагаемое). Это потери давления, вызванные распределением теплоносителя на артериолы,



местными потерями на пространственное искривление каналов и потерями на трение о стенки. Описываются коэффициентом $\zeta(\text{var})$ перед скоростным напором $\rho W^2/2$ в *артериолах*, и зависят от геометрических размеров и гидравлических характеристик участка контура, а также от изменения диаметра трубопровода, кривизны каналов и количества изгибов на участке.

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 G на соответствующую ткань. Зависит от геометрических размеров и гидравлических характеристик участка контура, а также от изменения диаметра трубопровода.

Сопротивление венозного участка (четвертое слагаемое). Фактически это фиксированные значения остаточного давления в низконапорной части БКК, необходимые для задания минимального тока теплоносителя из расчетного элемента обратно к источнику давления.

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 (G – пропорционально V).

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

Сила тяжести (пятое слагаемое). Описывает действие силы гравитации на организм (гидростатические потери, необходимые на преодоление высоты столба жидкости). Зависит от положений тела, определяется разницей вертикальных координат расчетного элемента и источника давления. Для элементов выше источника давления – дополнительные потери давления, ниже – наоборот, добавочный «подпор». Важнейший фактор в задачах о невесомости и гиподинамии.

Инерционные силы (шестое слагаемое). Описывает дополнительные инерционные потери, необходимые для преодоления силы инерции, действующей на теплоноситель при ускорении. Зависит от величины ускорения и его направления по отношению к току теплоносителя. Если ускорение «тормозит» теплоноситель, то это дополнительное сопротивление. Если «ускоряет» – источник энергии, повышающий давление. Инерционные силы – важнейший фактор в задачах о перегрузках, действующих на человека.

Компрессионное давление (седьмое слагаемое). Соответствует потерям давления на преодоление избыточного компрессионного (декомпрессионного) воздействия окружающей среды на расчетный элемент. 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.).

Расчет перепадов давлений и распределения теплоносителя в первом гидравлическом контуре

Расчетная гидравлическая схема кровеносной системы взрослого человека (рис. 2.4) включает в себя элементы большого и малого кругов кровообращения: аорто-артериальный участок, артериолы, капилляры и вены для основных потребителей (голова, руки, мышцы верхней половины туловища, внутренности, мышцы нижней половины туловища, ноги). Расчетная схема учитывает пространственное положение, схему делений, ответвлений и протяженность участков.

Расчет перепадов давлений в первом гидравлическом контуре осуществляется на начальном этапе гидравлического расчета. Используется система уравнений Бернулли (2.10) – (2.17), состоящая из семи уравнений, каждое из которых описывает потери давления в характерной группе потребителей:

$$P_a = \xi(\text{var})_1 \frac{\rho V_1^2}{2} + \zeta(\text{var})_1 \frac{\rho W_1^2}{2} + k(\text{var})_1 G_1 + ; \quad (2.10)$$

$$+ P_{\epsilon 1} + \rho g h_1 + \Delta P_{\text{уск}1} + \Delta P_{\text{ком}1}$$

$$P_a = \xi(\text{var})_2 \frac{\rho V_2^2}{2} + \zeta(\text{var})_2 \frac{\rho W_2^2}{2} + k(\text{var})_2 G_2 + ; \quad (2.11)$$

$$+ P_{\epsilon 2} + \rho g h_2 + \Delta P_{\text{уск}2} + \Delta P_{\text{ком}2}$$

$$P_a = \xi(\text{var})_3 \frac{\rho V_3^2}{2} + \zeta(\text{var})_3 \frac{\rho W_3^2}{2} + k(\text{var})_3 G_3 + ; \quad (2.13)$$

$$+ P_{\epsilon 3} + \rho g h_3 + \Delta P_{\text{уск}3} + \Delta P_{\text{ком}3}$$

$$P_a = \xi(\text{var})_4 \frac{\rho V_4^2}{2} + \zeta(\text{var})_4 \frac{\rho W_4^2}{2} + k(\text{var})_4 G_4 + ; \quad (2.14)$$

$$+ P_{\epsilon 4} + \rho g h_4 + \Delta P_{\text{уск}4} + \Delta P_{\text{ком}4}$$

$$P_a = \xi(\text{var})_5 \frac{\rho V_5^2}{2} + \zeta(\text{var})_5 \frac{\rho W_5^2}{2} + k(\text{var})_5 G_5 + ; \quad (2.15)$$

$$+ P_{\epsilon 5} + \rho g h_5 + \Delta P_{\text{уск}5} + \Delta P_{\text{ком}5}$$



$$P_a = \xi(\text{var})_6 \frac{\rho V_6^2}{2} + \zeta(\text{var})_6 \frac{\rho W_6^2}{2} + k(\text{var})_6 G_6 + ; \quad (2.16)$$
$$+ P_{e6} + \rho g h_6 + \Delta P_{\text{уск}6} + \Delta P_{\text{ком}6}$$

$$P_a = \xi(\text{var})_7 \frac{\rho V_7^2}{2} + \zeta(\text{var})_7 \frac{\rho W_7^2}{2} + k(\text{var})_7 G_7 + \quad (2.17)$$
$$+ P_{e7} + \rho g h_7 + \Delta P_{\text{уск}7} + \Delta P_{\text{ком}7}$$

Система уравнений (2.10) – (2.17) позволяет рассчитать распределение давлений на всех участках первого контура с учетом действия внешних факторов.

Расчет распределения теплоносителя в первом гидравлическом контуре. На втором этапе полученная система преобразовывается в систему уравнений (2.18) – (2.25), описывающих в явном виде расходы теплоносителя на семь основных потребителей:

$$k_1 G_1 + \xi_1 \rho \frac{V_1^2}{2} + \zeta_1 \frac{\rho W_1^2}{2} + \Delta P_1 = 0; \quad (2.18)$$

$$k_2 G_2 + \xi_2 \rho \frac{V_2^2}{2} + \zeta_2 \frac{\rho W_2^2}{2} + \Delta P_2 = 0; \quad (2.19)$$

$$k_3 G_3 + \xi_3 \rho \frac{V_3^2}{2} + \zeta_3 \frac{\rho W_3^2}{2} + \Delta P_3 = 0; \quad (2.20)$$

$$k_4 G_4 + \xi_4 \rho \frac{V_4^2}{2} + \zeta_4 \frac{\rho W_4^2}{2} + \Delta P_4 = 0; \quad (2.21)$$

$$k_5 G_5 + \xi_5 \rho \frac{V_5^2}{2} + \zeta_5 \frac{\rho W_5^2}{2} + \Delta P_5 = 0; \quad (2.22)$$

$$k_6 G_6 + \xi_6 \rho \frac{V_6^2}{2} + \zeta_6 \frac{\rho W_6^2}{2} + \Delta P_6 = 0; \quad (2.23)$$

$$k_7 G_7 + \xi_7 \rho \frac{V_7^2}{2} + \zeta_7 \frac{\rho W_7^2}{2} + \Delta P_7 = 0. \quad (2.24)$$

где ΔP – остаток давления на входе, приходящийся на каждый расчетный элемент, за вычетом уровня давления на выходе и внешних факторов.

$$\Delta P = P_a - P_e - \rho g h - \Delta P_{\text{уск}} - \Delta P_{\text{ком}}. \quad (2.25)$$

Система уравнений (2.18) – (2.25) относится к группе нелинейных уравнений с переменными коэффициентами, представляет собой ленточную матрицу с диагональными элементами и решается с помощью метода Крамера.

После расчета расхода теплоносителя на каждый потребитель, рассчитывается распределение полученного расхода между «ядром» и «оболочкой» каждого элемента. Расход теплоносителя, поступающего в «оболочку», определяется пропорционально количеству капилляров, приходящихся на подкожный слой.

Геометрическими и физическими условиями однозначности для уравнений являются геометрические размеры и гидравлические характеристики контура теплоносителя (морфологические свойства



кровеносной системы): объемный расход теплоносителя, средняя масса тела, давление на входе в систему, вид, диаметры, длины и количество трубопроводов гидравлической сети, и скорость течения теплоносителя (табл. П.2.1 ... П.2.4).

Определяемые гемодинамические параметры. Составленная система уравнений позволяет в квазистационарном приближении определять значения давления и объемного расхода для семи расчетных элементов в зависимости от внешних условий. Отдельно рассчитывается расход теплоносителя, поступающего в «оболочку», что позволяет в тепловом расчете учитывать количество тепла, переносимое теплоносителем из «оболочки» в «ядро» и начальную фазу охлаждения.

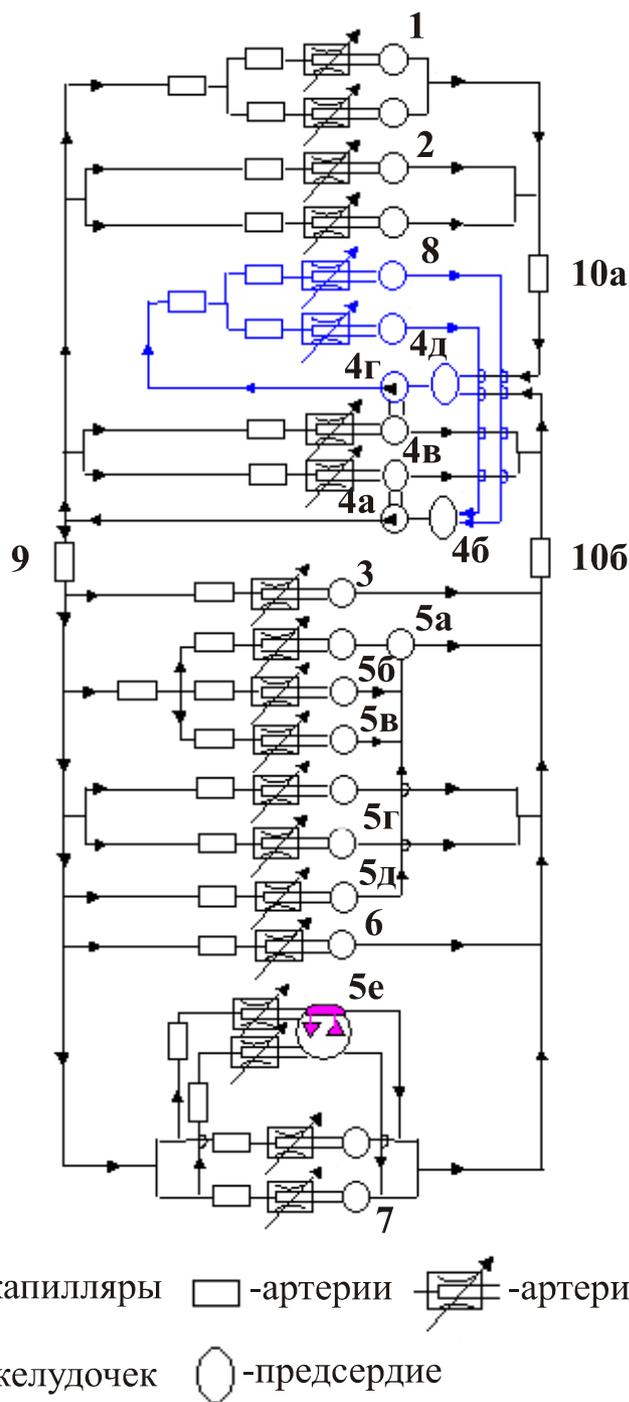


Рис. 2.4. Расчетная гидравлическая схема кровеносной системы человека: 1 – голова (правое и левое полушарие), 2 – руки, 3 – мышцы верхней части туловища, 4 – сердце (а – левый желудочек, б – левое предсердие, в – миокард, г – правый желудочек, д – правое предсердие), 5 – внутренности (а – печень, б – желудок, в – селезенка, г – почки, д – кишечник, е – репродуктивные органы), 6 – мышцы нижней части туловища, 7 – ноги, 8 – легкие, 9 – аорта, 10 – полые вены (а – верхняя, б – нижняя)

2.3. Характеристика полученных результатов

Сопrotивление аорто-артериального участка от источника давления до каждого расчетного элемента. Целью серии является расчет вклада сопротивления аорто-артериального участка в общее сопротивление гидравлического контура от источника давления до каждого расчетного элемента. Расчеты представлены для мужчин и женщин пяти возрастов (от 10 до 50 лет) (рис. 2.5).

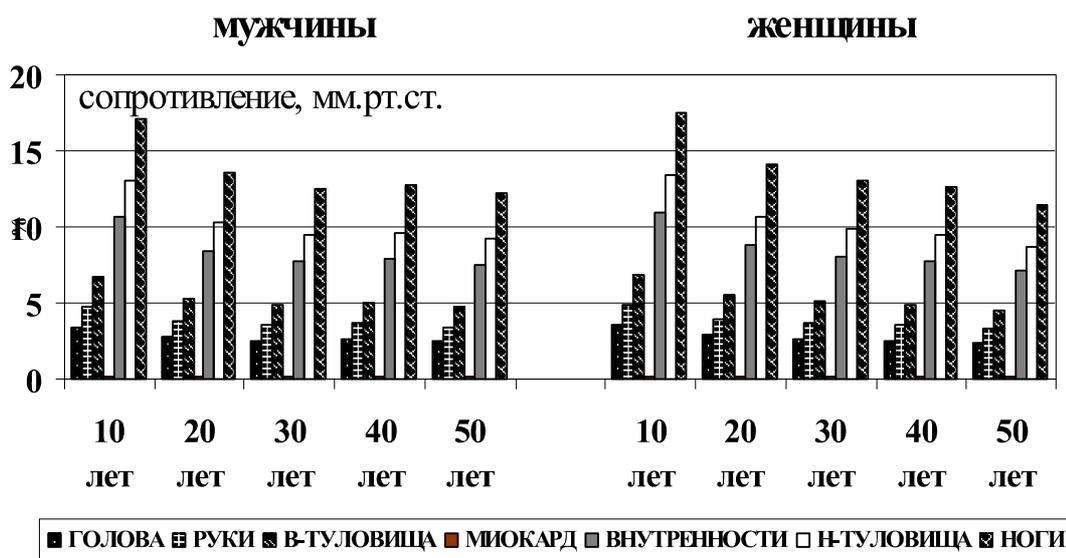


Рис. 2.5. Сопrotивление аорто-артериального участка от источника давления до каждого расчетного элемента

В результате исследований выявлены следующие закономерности: вклад сопротивления аорто-артериального участка от источника давления до каждого потребителя растет пропорционально удалению элемента от источника (т.е. ткани от сердца); диапазон вклада сопротивления ААУ в общее сопротивление составляет от 3 % до 17 % в зависимости от элемента. Наибольшим сопротивлением обладает участок от сердца до ног, т.к. он имеет наибольшую протяженность, а наименьшим сопротивлением – участок до миокарда. С возрастом доля сопротивления аорто-артериального участка в общем сопротивлении уменьшается в среднем на 30 %, причем у женщин градиент изменения больше, чем у мужчин.

Исследование влияния величины угла закрутки мышечных волокон (миоцитов) на энергетические характеристики теплоносителя. Целью серии является сравнение мощности и сопротивления вращательного компонента движения теплоносителя при различной величине угла закрутки миоцитов (от 30° до 70°). Расчеты выполнены для тридцатилетнего мужского и женского организма. Данные представлены в безразмерном виде (рис. 2.6): снизу – $N_{вращ} / N_{\Sigma}$, сверху – $\Delta P_{вращ} / \Delta P_{\Sigma}$, как доли в процентах от суммарной

мощности N_{Σ} и суммарного сопротивления ΔP_{Σ} . Реальный угол закрутки 55° выделен темным цветом.

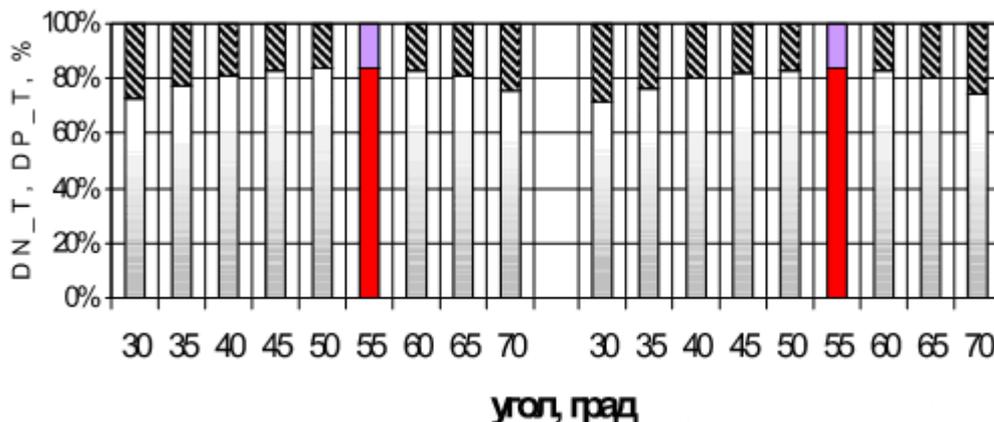


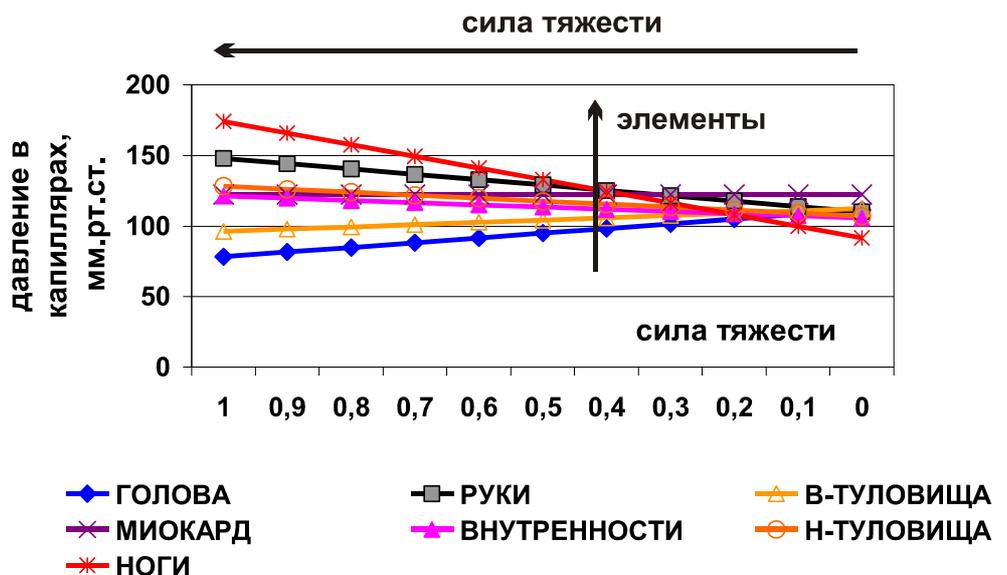
Рис. 2.6. Соотношение сопротивления (верх DP) и энергии (низ DN) вращательного движения теплоносителя для различных углов закрутки мышечных волокон

В пределах рассчитанного диапазона угла закрутки миоцитов доля вращательной мощности изменяется по параболе: от 73 до 84 % и далее уменьшается до 75 %. Максимум наблюдается при реальном угле 55° . Аналогичным образом, только по обратной параболе, выглядит изменение доли сопротивления. Минимальное сопротивление получилось при 55° – 16 %, максимальное при 30° и 70° – около 26 %. Итак, до 55° наблюдается опережающий прирост энергии, после 55° – наоборот, опережающий прирост сопротивления. Таким образом, удалось установить, что реальному углу соответствует оптимум, когда максимальный прирост энергии достигается при минимальном увеличении сопротивления.

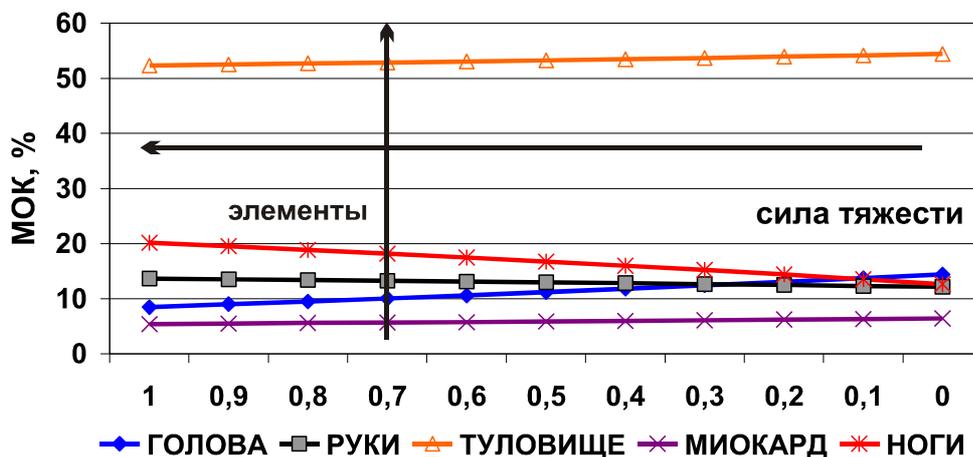
Влияние силы гравитации на остаточное давление и перераспределение теплоносителя между расчетными элементами. Одним из внешних факторов, учитываемых при моделировании гидросистемы, является сила гравитации. Цель серии – исследовать влияние силы гравитации на остаточное давление в элементах $\Delta P_{кан}$ и перераспределение теплоносителя (минутный объем крови (МОК)) для 30-летнего мужчины. Снятие гидростатического столба жидкости моделируется путем уменьшения коэффициента перед слагаемым $\rho g h$ от 1 до 0 (цифры по оси X). С физической точки зрения это соответствует перемещению тела из вертикального положения в горизонтальное. Установлено, что с уменьшением силы гравитации очень сильно изменяется давление в элементах системы (рис. 2.7, а) По сути, оно «выравнивается» во всех потребителях, т.к. исчезает необходимость преодолевать силу тяжести. Это, в свою очередь, приводит к значительному перераспределению теплоносителя между расчетными элементами: резко увеличивается приток к голове и

элементам выше источника давления, а к элементам, расположенным ниже источника давления – уменьшается (рис. 2.7, б).

Влияние внешней работы на перераспределение теплоносителя между элементами. Другим фактором, влияние которого учитывается в данной методике, является внешняя работа (физическая нагрузка). Физические упражнения, направленные на все группы мышц, оказывают заметное влияние на перераспределение теплоносителя между элементами, в частности на распределение между «ядром» и «оболочкой» отдельных элементов (рис. 2.8). С ростом физической нагрузки увеличивается расход теплоносителя на «оболочку» и средний слой «ядра» (кожу и мышечную группу) и на миокард на 3 ... 5%, а расход на внутреннюю часть «ядра» (внутренние органы) соответственно уменьшается. При этом количество крови, поступающей в подкожные капилляры, резко возрастает с 0,04 до 0,5 л/мин от общего расхода на мышцы рук и с 0,05 до 0,8 л/мин на ноги, что достоверно отражает механизм сброса тепла через кожу при интенсивных нагрузках.



а



б

Рис. 2.7. Влияние силы гравитации на расходно-напорные характеристики: а – остаточное давление; б – перераспределение теплоносителя между элементами

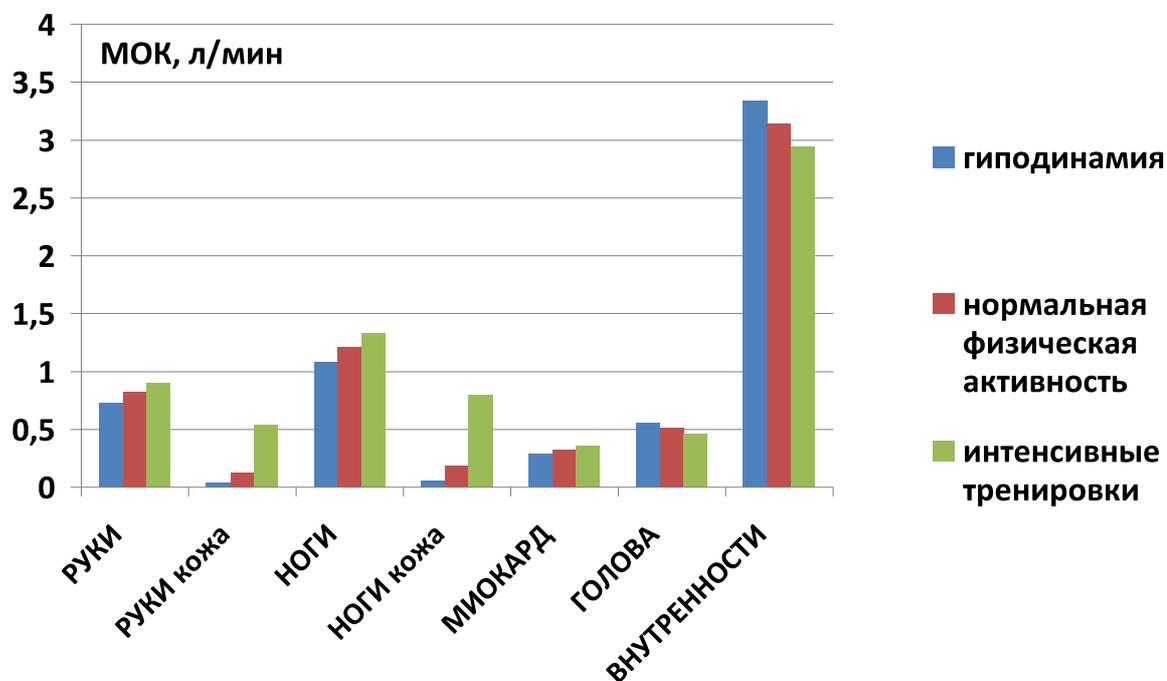


Рис. 2.8. Влияние внешней работы на перераспределение теплоносителя между расчетными элементами и слоями

2.4. Проверка достоверности методики расчета гидравлических характеристик в контуре теплоносителя

Влияние изменения диаметров капилляров на объемный расход теплоносителя. Проверка достоверности выполнена для головного мозга (рис. 2.9). По оси Y – отложен в процентах расход теплоносителя (крови) на элемент, по оси X – пять возрастных диапазонов от десяти до пятидесяти лет, для которых изменялся диаметр капилляров от 0,5 до 1,5 раз от нормы. Светлыми линиями обозначены данные для женского организма, темными – для мужского, выделенные (жирные) точки – значение расхода при нормальном диаметре капилляров. В пределах каждого возраста по оси X обозначен диапазон изменения диаметров (спазма-расширения) капилляров внутренностей: спазм – слева, расширение – справа. Горизонтальными линиями обозначены установленные из литературы значения расходов: верхняя – для невесомости, нижняя – для поверхности Земли, полученные для среднестатистического человека (30 лет, рост 170 см, вес 70 кг, мужчина).

В результате анализа установлены пропорции расхода теплоносителя на головной мозг: у мужчин около 9 %, у женщин более 11 %. Т.е. в процентном

соотношении от общего расхода кровоснабжение мозга у женщин больше на 20 %. При нормальном состоянии сосудов наблюдается совпадение полученных результатов с литературными данными в пределах 10 %. При спазме сосудов внутренностей расход в голове увеличивается до 25%, а при расширении – уменьшается до 1–2 %.

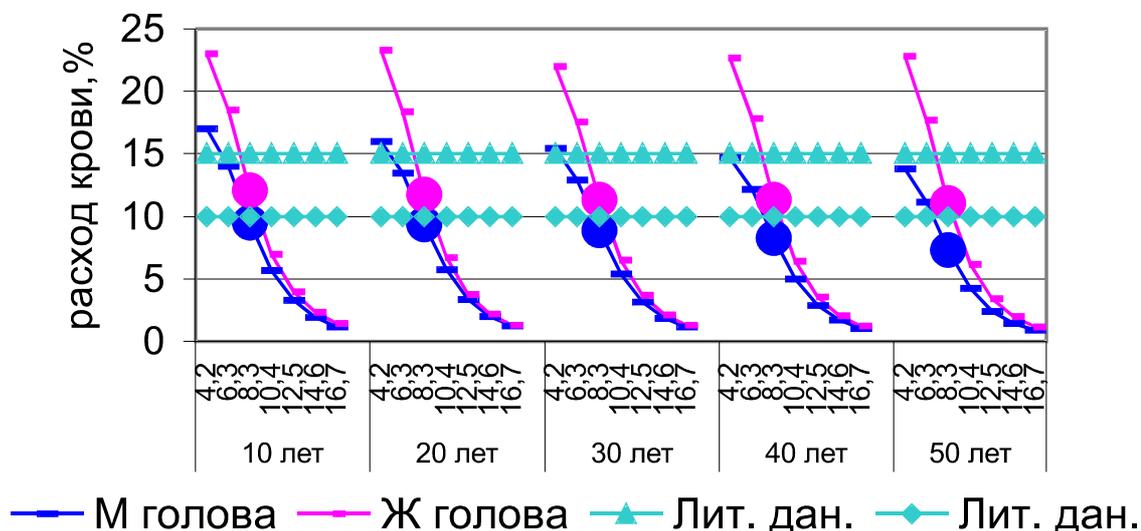


Рис. 2.9. Влияние спазма и расширения капилляров внутренностей на кровоснабжение головного мозга

Влияние морфологических свойств капилляров на кровоснабжение головного мозга. Для большей наглядности на следующую диаграмму (рис. 2.10) вынесены данные о расходе крови на голову для мужского и женского организма (при изменении диаметра капилляров в ногах). Выделены расходы крови при нормальном диаметре капилляров, в центре – литературные данные (10 % – соответствуют наземным условиям, 15 % – невесомости).

Проведенное сравнение всех групп тканей показало, что распределение крови в мужском и женском организмах различны. У женщин в процентном соотношении преобладает кровоснабжение головы и внутренностей, а у мужчин – мышечной группы, что связано с большим объемом мышечной массой.

Таким образом, наилучшее совпадение с точностью 10 % получено для возраста 30 лет мужского организма нормального состояния капилляров. С возрастом, полом и изменением диаметров капилляров наблюдается адекватное отклонение данных, причем изменение диаметра капилляров приводит к существенному отклонению параметров, вызванному перераспределением сопротивлений в БКК. Что показывает чувствительность и возможности разработанной методики.

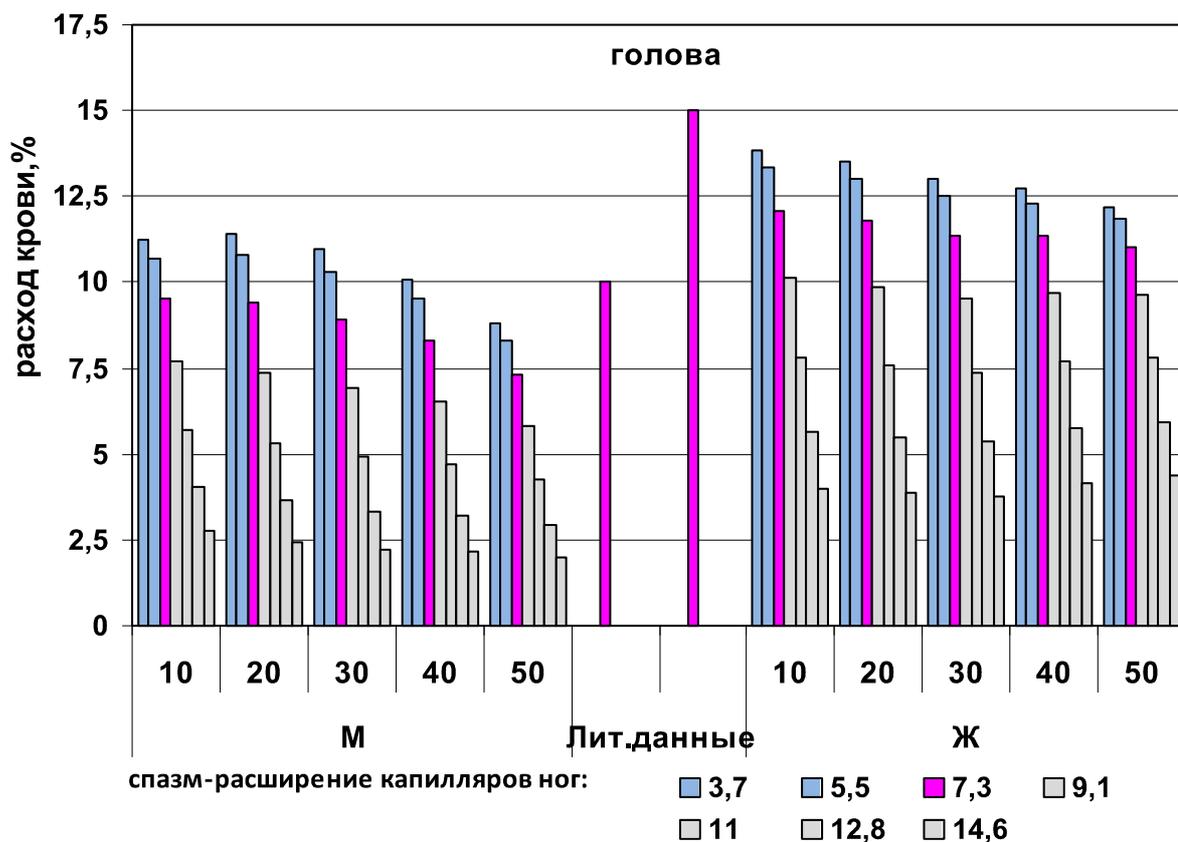


Рис. 2.10. Влияние морфологических свойств капилляров на кровоснабжение головного мозга (при спазме-расширении капилляров ног)

Вклад сопротивления аорто-артериального участка и артериол в общее сопротивление гидравлического контура. Учет сопротивлений элементов аорто-артериального участка и артериол приводит к заметному снижению давления в капиллярах, причем отклонения тем больше, чем больше протяженность гидравлического контура от источника давления до элемента (рис. 2.11). Сопротивление ААУ и артериол достигает 40 – 50 % от давления на входе. Таким образом, до половины мощности источника давления расходуется на транспортировку теплоносителя по этим участкам. Артериольный участок дает самый большой вклад в сопротивление гидравлического контура. Давление же в капиллярах миокарда практически не изменяется при учете сопротивления участков сосудистого русла и равняется систолическому давлению (давлению на входе). Полученные данные качественно и количественно согласуются с известными из литературы экспериментальными данными.

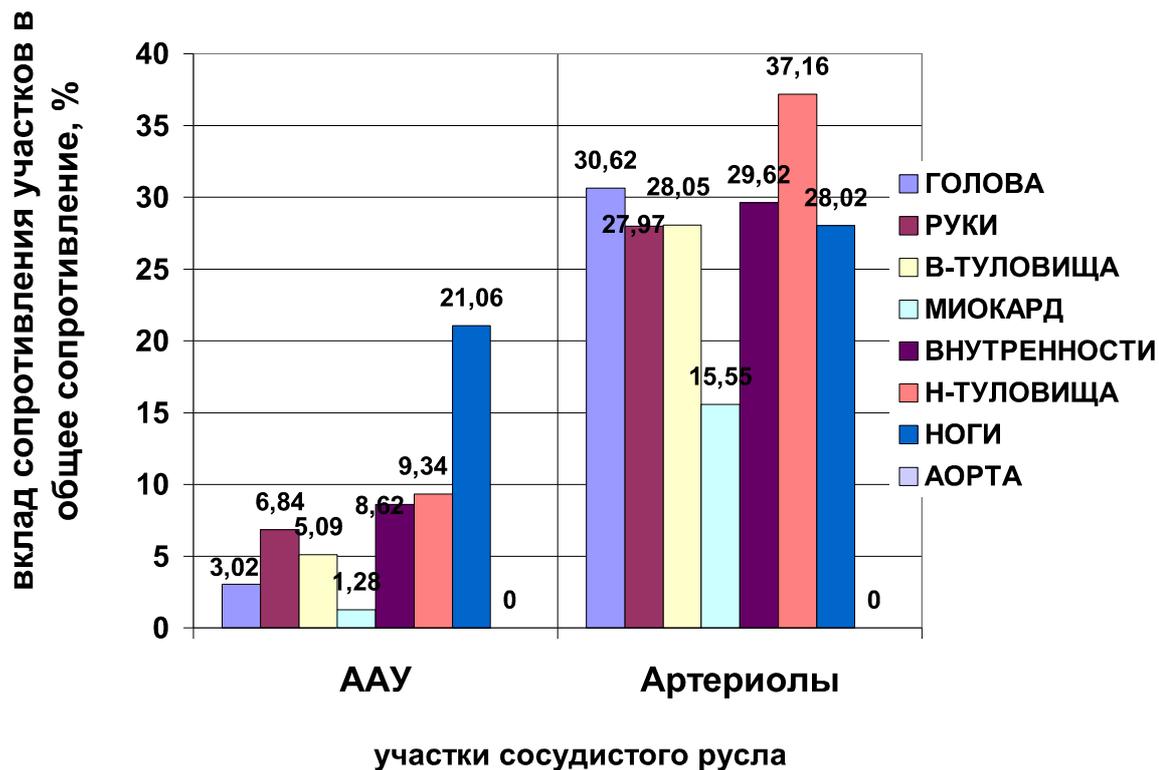


Рис. 2.11. Вклад сопротивления аорто-артериального участка и артериол в общее сопротивление гидравлического контура

Выводы

1. Показано, что оптимальным углом закрутки миоцитов является угол 55° , т.к. в этом случае происходит максимальный прирост энергии при минимальном приросте сопротивления. Рассчитан вклад сопротивления аорто-артериального участка от источника давления до каждого расчетного элемента. Установлено, что сопротивление растет пропорционально удалению элемента от источника: от 3 % до 17 % в зависимости от удаления. Кроме того, выявлен вклад сопротивления аорто-артериального и артериольного участков контура, который составляет 40 ... 50 % от общего сопротивления. Установлено, что внешняя работа приводит к увеличению объемного расхода теплоносителя на «оболочку» в 3 ... 4 раза. Изменение диаметров трубопроводов также ведет к перераспределению теплоносителя между расчетными элементами: уменьшение диаметров в одном элементе приводит к увеличению расхода в другом на 15 ... 25 %.

2. Показано что изменение силы гравитации от 0 до 1 g меняет величину расхода теплоносителя на расчетный элемент на 20...50 %. Механическая работа термодинамической системы увеличивает расход в ядре расчетного элемента на 15 ... 30 %, а в слое теплоизоляции на 100...200 %.

3. В качестве проверки достоверности проведено исследование влияния изменения диаметров трубопроводов на расходно-напорные характеристики



элементов в контуре, а также оценка вклада сопротивления различных участков гидравлической системы. В результате сравнения расчетных данных с известными опубликованными данными установлено расхождение $\pm 10\%$, показаны чувствительность и возможности методики расчета и оценены границы ее применимости.

4. Разработанная методика позволяет рассчитывать расход теплоносителя, поступающего в «оболочку» при охлаждении, для учета количества тепла, переносимого кровью, при расчете тепловых процессов в системе «человек – окружающая среда».