

UOT: 372.8:53, 372.8:50

Ş.Ş.Əmirov, E.S.Hüseynova, D.G.Qasımova

Azərbaycan Tibb Universiteti

phys_med@mail.ru

MAYE AXINI QANUNLARININ BƏZİ TİBBİ TƏTBİQLƏRİ

Açar sözlər: *laminarlıq, turbulენტlik, hemodinamika, ateroskleroz, özlülük, nyuton və qeyri-nyuton mayelər*

Məqalədə maye axını qanunlarının insanın qan damarlarında qanın axmasına bəzi təbiiqləri tədqiq olunmuşdur. Axının kəsilməzlik tənliyi ilə geniş damarlar və kapilyarlar sistemində qanın axmasına və Bernulli tənliyi ilə fizioloji məhlulun şprisində hərəkətinə baxılmış, yuxarıdakı qanunların təbiiqi ilə şpris tənliyi üçün ifadə alınmışdır. Məqalədə mayelərin ideallıq və reallıq xüsusiyyətləri nəzərdən keçirilmiş və nyuton və qeyri-nyuton mayelər təhlil olunmuşdur. Burada hemodinamikanın əsas anlayışları verilmiş və onlar vasitəsi ilə real (özlü) mayelərin axınını təsvir edən Nyuton və Puazeyl qanunları araşdırılmışdır. Özlülüyn geniş damarlar və kapilyarlarda müxtəlifliyi və onun müxtəlif patoloji halların göstəricisi olması öyrənilmişdir. Damarlarda qanın axını (Puazeyl qanunu) və elektrik dövrəsində cərəyanın axını (Om qanunu) müqayisə olunaraq qan üçün hidravlik müqavimətin ifadəsi verilmiş və qanın həcmi sürətinin damarların daxili radiusundan asılılığı öyrənilmişdir. Həmçinin hidravlik müqvimətin qiymətindən asılı olaraq damarlarda təzyiqin paylanmasına baxılmışdır. Mayelərin axınının laminarlığı və turbuləntliyi müzakirə edilmiş (Reynolds ədədi verilmiş) turbuləntliyin qan təzyiqinin ölçülməsində rolu və burada yaranan küylərin diaqnostik əhəmiyyəti qeyd olunmuşdur.

Ш.Ш.Амиров, Э.С.Гусейнова, Д.Г.Касымова

НЕКОТОРЫЕ МЕДИЦИНСКИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ЗАКОНОВ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ

Ключевые слова: *ламинарное течение, турбулентность, гемодинамика, атеросклероз, вязкость, ньютоновские и неньютоновские жидкости*

В статье рассматриваются некоторые применения законов течения жидкости для кровотока в кровеносных сосудах человека. Рассмотрены течения крови в обширной сосудистой и капиллярной системе с помощью уравнения непрерывности струя и движение физиологического раствора в шприце используя уравнения Бернулли, а также применяя вышеуказанные законы получено уравнение шприца. Здесь также рассматриваются идеальные и реальные жидкости и анализируются ньютоновские и неньютоновские жидкости. В статье представлены основные понятия гемодинамики и исследованы законы Ньютона и Пуазейля, которые описывают течение реальных (вязких) жидкостей. Было изучено, что вязкость широко варьирует в сосудах и капиллярах и является

показателем различных патологических состояний. Сравнением кровотока в сосудах (закон Пуазейля) и электрического тока (закон Ома) дается выражение гидравлического сопротивления крови и зависимость скорости объема крови от внутреннего радиуса сосудов. Также исследовано распределение артериального давления в сосудах в зависимости от значения гидравлического сопротивления. Обсуждались ламинарное течение и турбулентность течения жидкости (по числу Рейнольдса), роль турбулентности в измерении артериального давления и диагностическая ценность создаваемого шума.

Sh.Sh.Amirov, E.S.Huseynova, D.G.Kasumova

SOME MEDICAL APPLICATIONS OF LIQUIDS' FLOW LAWS

Keywords: *laminar flow, turbulence, hemodynamics, atherosclerosis, viscosity, newtonian and non-newtonian liquids*

In this paper some applications of fluid flow laws for blood flow in human blood vessels are investigated. Equation of continuity is used to consider the blood flow in the vascular system. Bernoulli's equation is employed to study movement of physiological saline in the syringe. Using both above laws the syringe equation is obtained. Ideal, real fluids are also considered here, and Newtonian and non-Newtonian fluids are analyzed. The article presents the basic concepts of hemodynamics and explores the Newton and Poiseuille's laws, describing the flow of real (viscous) fluids. It has been studied that viscosity varies in wide vessels and capillaries and is an indicator of various pathological diseases. A comparison of blood flow in the vessels (Poiseuille's law) and electric current (Ohm's law) yields expression of the hydraulic resistance of blood and the dependence of the velocity of blood volume versus inner radius of vessels. The distribution of blood pressure in the vessels, depending on the value of hydraulic resistance also is investigated. The laminar flow and turbulence of the fluid flow (by the Reynolds number), the role of turbulence in measuring blood pressure, and the diagnostic value of the noises were discussed.

1. GİRİŞ

Tibb və biologiya elmlərinin müxtəlif inkişaf mərhələlərində fizika qanunlarının rolu bir sıra tədqiqat işlərində öz əksini tapmışdır. Təsadüfi deyil ki, buna əks fikir, yəni fizikanın özünün də inkişafına həmin elm sahələrində çalışan tədqiqatçıların böyük töhvələr verməsi doğrudur. Bir sıra həkim və fizioloqlar, məs., Yung Tomas, Puazeyl Jan Lui Mari, Mayer Yulius Robert, Helmhols German Ludviq Ferdinand, Darsonal Jak Arsen və s. öz tədqiqatlarında müəyyən fiziki hadisələrin öyrənilməsinə müvəffəq olmuşlar. Fransız fiziki və fizioloqu Puazeyl nazik silindrik borularda maye axınını və daxili sürtünməni öyrənmiş və ilk dəfə qan təzyiqinin öyrənilməsi üçün civəli

manometri tətbiq etmişdir [7]. Alman həkimi Mayer enerjinin saxlanması və çevrilməsi qanununu tapan ilk tədqiqatçılar sırasındadır.

İnsan orqanizmində gedən bir sıra makroproseslər təbiətə fiziki proseslərdir. Misal üçün, mürəkkəb fizioloji proses olan qan dövrəni maye axını qanunları ilə, qan damarlarında elastik rəqslərin yayılması rəqs və dalğalarla, ürəyin işi mexanika ilə, biopotensialların yaranması elektrik sahəsi ilə və s. əlaqəlidir.

2. MÜZAKİRƏLƏR

Maye axınının öyrənilməsi bilavasitə biologiya və təbabətə əlaqədardır. Elmin bu sahəsində tanınmış alimlərdən biri olan fransız həkim L.M.Puazeyl tərəfindən mayenin axınının tədqiq edilməsinin əsas səbəbi onun insan bədənində qanın axmasına göstərdiyi marağı olmuşdur.

Əgər sürtünmə qüvvələri nəzərə alınmazsa, sıxılmayan mayenin hərəkəti Bernulli tənliyi ilə ifadə olunur [6]. Bu tənlik maye axan boruda statik, hidrostatik və dinamik təzyiqlərin cəminin sabit qalmasını ifadə edir:

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

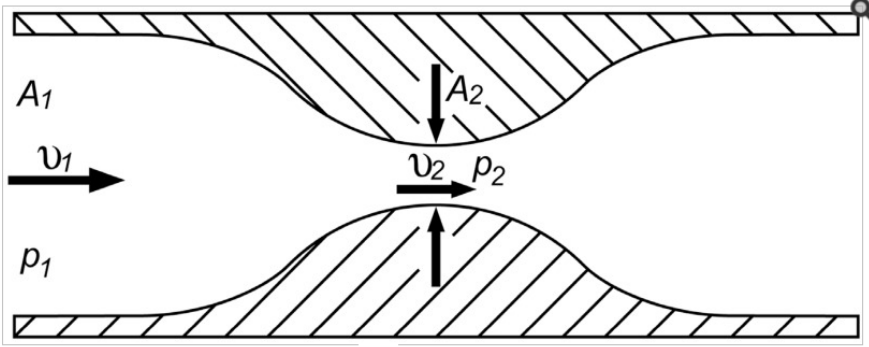
burada P - statik mayedəki təzyiq ρ - mayenin sıxlığı v - mayenin ixtiyari nöqtədəki sürəti h - isə maye hissəciklərinin müəyyən istinad səviyyəsindən hündürlüyüdür. Tənliyin birinci həddi mayedə təzyiqin mövcudluğu ilə əlaqədar olan potensial enerji sıxlığıdır (başqa sözlə, vahid həcmə düşən potensial enerji). Bu səbəbdən həmin kəmiyyət həm təzyiq (N/m^2 , $dina/sm^2$), həm də enerji ($\frac{J}{m^3}$, erq/cm^3) vahidləri ilə ifadə oluna bilər. Tənlikdəki ikinci və üçüncü hədlər uyğun olaraq maye hissəciklərinin vahid həcmə düşən qravitasiya potensial və kinetik enerjiləri ilə təyin olunan hidrostatik və dinamik təzyiqlərdir. Bernulli tənliyi boruda axan maye üçün enerjinin saxlanması qanununun riyazi ifadəsidir. Tənliyin hədləri enerjini ifadə etdiklərinə görə sürtünmə qüvvələri olmadıqda axının necə dəyişməsindən asılı olmayaraq həmin hədlərin (enerji sıxlıqlarının) cəmi sabit qalmalıdır. Yuxarıdakı tənliyin təhlili göstərir ki, maye sıxılmayan olduğu üçün borunun hər hansı kəsiyindən vahid zamanda axan mayenin həcmi eynidir. Əgər mayenin hərəkətini en kəsikləri A_1 və A_2 olan iki hissədən ibarət olan boruda təsəvvür etsək [3] (şəkl.1.), onda maye kütləsinin saxlanması görə axının kəsilməzliyi tənliyini alırıq

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (2)$$

Tənlikdən göründüyü kimi, $A_1 > A_2$ şərti ödənərsə $v_2 > v_1$ olar və yaxud əksinə.

İnsan bədənində ümumi qan kütləsinin dəyişməməsinə görə həm geniş (A_1 en kəsikli böyük radiusa malik aorta və arteriyalar), həm də ensiz (A_2 en

kəsikli kiçik radiusa malik kapilyarlar) damarların ümumi en kəsiklərindən vahid zamanda axan qanın həcmi eynidir.



Şəkil 1

Məlum olduğu kimi, kapilyar damarların sayının kifayət qədər çox olmasına görə onların en kəsikləri sahələrinin cəmi (A_2) aorta və arteriyaların en kəsiklərinin ümumi sahəsindən (A_1) xeyli böyük olduğundan kapilyarlarda axan qanın sürəti geniş damarlardakı sürətdən dəfələrlə kiçik olur. İki müxtəlif en kəsiyə malik boru üçün yuxarıdakı iki tənlikdən alırıq

$$p_2 = p_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} \left[1 - \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 \right] \quad (3)$$

Bu tənlikdən görünür ki, ikinci en kəsiyin sahəsi birinci en kəsiyin sahəsindən çox kiçik olanda həmin kəsikdə təzyiq üçün mənfi qiymət alınır.

İndi isə Bernulli və axının kəsilməzliyi tənliklərinin tibbi sprisdə fizioloji məhlulun hərəkətinə tətbiqini nəzərdən keçirək. (1) tənliyini müəyyən hesablama cisminə görə eyni hündürlüyə malik iki müxtəlif en kəsikli boru üçün yazaq

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 \quad (4)$$

Bildiyimiz kimi, spris böyük en kəsikli (A_1) dərman maddəsinin hərəkət etdiyi bölgülü borudan və kiçik en kəsikli (A_2) iynədən ibarətdir. Əgər dərman maddəsinin borudakı və iynədəki sürətləri uyğun olaraq v_1 və v_2 olarsa $A_1 \gg A_2$ olduğundan $v_1 \ll v_2$ olar. Onda (4) tənliyinin sol tərəfindəki ikinci həddi nəzərə almaya bilərik.

$$P_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 \quad (5)$$

Spris iyənəsinin açıq ucu atmosferlə əlaqəli olduğundan dəqiq hesablamalarda atmosfer təzyiqi nəzərə alınmalıdır. Lakin sadə hesablamalarda (5) tənliyindəki $P_1 - P_2$ təzyiqlər fərqi sprisin porşeninə barmağımızın təsir qüvvəsinin (F) borunun S_1 en kəsiyi sahəsinə nisbəti ilə əvəz edə bilərik. Başqa sözlə,

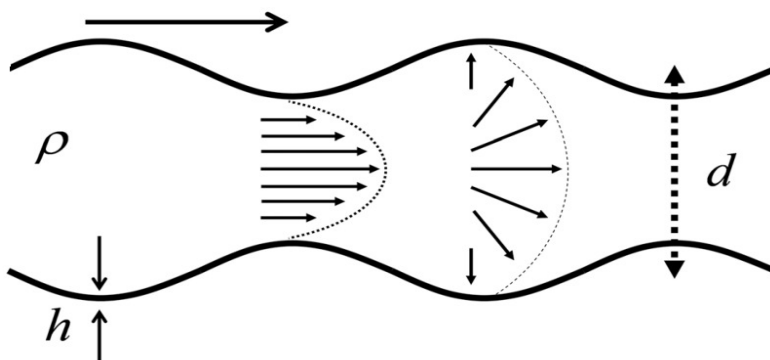
$$\frac{F}{S_1} = \frac{1}{2} \rho v_2^2 \quad (6)$$

Bu tənlikdən iynə daxilində fizioloji məhlulun axma sürətini tapsaq,

$$v_2 = \sqrt{\frac{2F}{S_1}} \quad (7)$$

olar. Qeyd edək ki bəzi ədəbiyyatlarda bu düstur (*syringe equation*) yəni *spris tənliyi* adı ilə verilir

Ateroskleroz və damarlarda qanın təzyiqi. Bu xəstəlik zamanı arteriyaların divarları qalınlaşır və damarın daxili divarında toplanmış çöküntülərə görə damar daralır ki, bu da stenosis adlanır (bax şəkl.1). Stenosisin yaratdığı fəsadlardan biri Bernulli tənliyi ilə izah oluna bilər. Fərz edək ki, damarın radiusu 2 dəfə azalmışdır. Onda en kəsiyin sahəsi 4 dəfə azalır və bu həmin kəsiyədə sürətin 4 dəfə artması deməkdir. Daralmış hissədə kinetik enerji $4^2 = 16$ dəfə artır. Kinetik enerjinin artması təzyiq sərfi ilə əlaqədardır. Böyük sürətdə axını təmin etmək üçün potensial enerjinin bir hissəsi kinetik enerjiyə çevrilir. Arteriyanın daralmış hissəsində təzyiqin düşməsinə görə xarici təzyiqin təsiri ilə arteriyanın qapanması və qan axınının dayanması baş verə bilər. Əgər belə bloklaşma qanı ürəyə aparacaq arteriyada baş verirsə, ürəyin fəaliyyəti dayana bilər. Stenosis üçün 80% kritik qiymət hesab olunur, çünki bu faiz dərəcəsində axın turbulent olur və damarın zədələnməsinə səbəb ola bilər. Bu onunla izah olunur ki, qanın bir hissəsinin damarın divarına göstərdiyi təzyiq zərbəsi ilə damarın divarındakı çöküntü təbəqəsi qopa bilər və daralmış hissəni tıxayır. Əgər belə tıxanma boyun arteriyasında baş verirsə, beyinin bəzi hissələrinə qanın axını dayanır və bu *işemik insultra* səbəb olur [4]. Arteriyanın divarları yarım-elastikliyə malikdir. Qan elastik damarlarda impulslarla yayılır və bu zaman divarlar genişlənməyə və sıxılmaya məruz qalır (şəkil 2).



Şəkil 2

Qanın axma sürəti isə damar toxumasının elastiklik modulundan asılıdır və Moen-Kortveg dusturu [4] ilə verilir.

$$v = \left(\frac{Eh}{\rho d} \right)^{1/2} \quad (8)$$

burada E-damar toxumasının Yunq modulu, h-divarın qalınlığı, ρ – qanın sıxlığı, d- isə damarın daxili diametridir.

Stenosisin digər fəsadı arteriyaların elastikliyi ilə əlaqədardır. Arteriyalar elastik yayın xassələrinə malik olduğundan müəyyən məxsusi tezliklə rəqs edə bilirər. Bu məxsusi tezlik sağlam arteriyalarda 1-2 kHs intervalındadır. Lakin daxili divarda olan çöküntülər divarın kütləsini artırmaqla onun elastikliyi azaldır. Bu azalma məxsusi rəqs tezliyinin də bir neçə yüz Hs-ə qədər düşməsinə səbəb olur. Qanın axın impulsları 450 Hs tərtibində tezlik toplananlarına malik olur. Çöküntülərlə örtülmüş damarlar özlərinin kiçik məxsusi rəqs tezliklərinə malik olduqlarından onlar qanın impulsvari rəqsləri ilə rezonansa gəldikdə çöküntülər divarlardan qoparaq damarları zədələyə bilir.

İdeal və Real mayələrin axını. Axan maye təbəqələri arasında sürtünmə qüvvələrinin (özlülük adlı fiziki anlayışla xarakterizə olunur) olub-olmamasından asılı olaraq mayələr birinci halda real, ikinci halda isə ideal mayələr adlanır. Real mayələrdə özlülük daxili sürtünmə olaraq mayenin bir hissəsinin onun digər hissəsinə nisbətən sürüşməsinə müqavimət göstərir. Özlülük ilk növbədə, molekulların yürüklüyünü məhdudlaşdıran qarşılıqlı təsir ilə təyin olunur. Özlülüynün olması molekulların hərəkət enerjisinin səpilməsi və tədricən istiliyə çevrilməsi ilə nəticələnir. Daxili sürtünmə qüvvəsinə malik mayenin axınının əsas qanunu ilk dəfə ingilis alimi İ.Nyuton tərəfindən verilmişdir.

$$F_{öz.} = \eta \frac{dv}{dz} S \quad (9)$$

Burada $F_{öz.}$ – maye təbəqələri bir-birinə nəzərən sürüşən zaman meydana çıxan sürtünmə qüvvəsi (N) η – mayenin dinamik özlülük əmsalı ($Pa \cdot san$), S – sürüşən maye təbəqələrinin toxunan səthlərinin sahəsi (m^2), $\frac{dv}{dz}$ – sürət qradiyenti adlanır və z oxu istiqamətində təbəqədən-təbəqəyə keçdikdə sürətin nə qədər dəyişməsinə göstərir və 1/san ilə ölçülür. SQS sistemində özlülük əmsalı $Puaz$ adlanır $1 Pa \cdot san = 10Puaz$.

Nyuton və qeyri-nyuton mayələri. Özlülükdən asılı olan xassələrinə görə mayələr iki növə ayrılır: nyuton və qeyri-nyuton mayələri. Nyuton mayələri üçün dinamik özlülük əmsalı mayenin təbiətindən və temperaturundan asılıdır. Belə mayələr yuxarıdakı Nyuton tənliyinə (9) tabe olur və daxili sürtünmə qüvvəsi sürət qradiyenti ilə düz mütənəsbdir. Qeyri-nyuton mayələrdə dinamik özlülük əmsalı mayenin təbiəti və temperaturundan başqa mayenin axın rejimi və sürət qradiyentindən asılıdır. Hər bir real maye kimi qan da özlülüyə malikdir və plazmada formalı elementlərin suspenziyası

olmaqla qeyri-nyuton mayedir. Qan plazmasının özü isə praktik olaraq nyuton mayesidir. Formalı elementlərin 90%-i isə eritrositlərdir. Eritrositlərin əsas xüsusiyyəti isə onların birləşərək daha böyük aqreqatları əmələ gətirmələridir. Eritrosit və aqreqatların xarakterik ölçüləri aşağıdakı nisbətdədir; $d_{er.} \approx 8\mu m$ $d_{aq.} \approx 10d_{er.}$ Eritrosit, aqreqat və damarların ölçülərinin nisbətindən asılı olaraq özlülük (daxili sürtünmə) (9) tənliyinə tabe olmur. Aorta və arteriyalar üçün $d_{damar} > d_{aq.}$ və $d_{damar} \gg d_{er.}$ Bu halda $\eta \approx 0005 Pa \cdot san$ olur. Kiçik arteriya və arteriollarda $d_{damar} \approx d_{aq.}$ və $d_{damar} = (5 - 20) d_{er.}$ Bu halda aqreqatlar eritrositlərə parçalanır və damarın divarları ilə sürtünmə azalır. $d_{damar} = 5 d_{er.}$ olduqda özlülük geniş damarlardakı özlülüğün $2/3$ hissəsi qədər olur. Mikro damar və ya kapilyarlarda $d_{damar} < d_{er.}$ Bu halda diametri $5-6\mu m$ olan kapilyarlarda eritrositlər deformasiya edir və damar divarının səthi ilə sürtünmə sahəsi artır. Suyun özlülüğünü $\eta_{su} = 0,01$ Puaz, normal halda qanın özlülüğünü $\eta_{qan} = (4,2 - 6)\eta_{su}$, patoloji halda $\eta_{qan} = (15 - 20)\eta_{su}$, anemiyada $\eta_{qan} = (2 - 3)\eta_{su}$, plazmanın özlülüğünü isə $\eta_{plazm.} = 1,2\eta_{su}$ kimi qiymətləndirilir.

Əsas hemodinamik anlayışlar. Hemodinamika tibbi və bioloji fizikanın damarlarda qanın hərəkət qanunlarını öyrənən sahəsidir.

Qan təzyiqi. Qanın damarlara etdiyi təzyiqdır. $P = \frac{F}{S}$ burada F – damarın daxili səthinə perpendikulyar istiqamətdə təsir edən yekun qüvvə, S – isə damarın daxili səthinin sahəsidir.

Həcmi sürət. Damarın verilmiş en kəsiyindən vahid zamanda axan qanın həcmidir

$$Q = \frac{V}{t} \quad (10)$$

Burada V – həcm (m^3), t – isə zamandır (san).

Xətti sürət. Qan hissəciklərinin vahid zamanda qət etdiyi məsafədir

$$v = \frac{l}{t} \quad (11)$$

burada l – məsafə (m), t – isə zamandır (san).

Həcmi sürətlə xətti sürət arasındakı əlaqə $Q = vA$ kimidir burada A – damarın en kəsiyinin sahəsidir. Qanın damarlarda axını qanunlarının təhlilində qəbul olunur ki, orqanizmdə dövr edən qanın miqdarı dəyişmir. Bu faktdan damar sisteminin ixtiyari en kəsiyində qanın həcmi sürətinin sabit qalması nəticəsinə gəlirik. $Q = \text{Konstant}$.

Maye axınının növləri

1. Laminar axın. Mayenin nizamlı axınıdır; bu zaman maye axın istiqamətində bir birinə paralel olan laylarla axır. Laminar axında mayenin sürəti borunun en kəsiyi boyunca parabolik qanunla dəyişir [5].

$$v = v_0 \left(1 - \frac{Z^2}{R^2}\right) \quad (12)$$

burada R – borunun radiusu. v_0 – borunun oxu istiqamətindəki sürət, Z – borunun oxundan axın istiqamətinə perpendikulyar istiqamətdə olan məsafədir.

2. Turbulent axın. Sürətin artması ilə axın laminarlıqdan turbulentliyə keçir; bu zaman maye təbəqələri bir birinə qarışır və axın selində çoxlu sayda müxtəlif ölçülü burulğanlar yaranır. Mayenin kiçik həcmli mürəkkəb trayektoriyalar boyunca xaotik hərəkət edir. Turbulent axın üçün axın sürətinin hər bir nöqtədə zaman keçdikcə qeyri-müntəzəm dəyişməsi xarakterikdir. Turbulent axında orta sürətin borunun radiusu boyunca paylanması laminar axındakı parabolik paylanmadan fərqlənir. Bu zaman divarlara yaxın hissələrdə sürət daha tez artır və mərkəzi hissədə paylanma daha az əyriliyə malik olur. Turbulent axında sürətin paylanması logarifmik asılılığa malik olur və maye axınının rejimi Reynolds ədədi ilə xarakterizə olunur [6]:

$$v_{krit.} = \frac{Re\eta}{\rho D} \quad (13)$$

burada v – borunun en kəsiyi üzrə orta sürət, D – borunun diametridir.

Reynolds ədədi Re bir çox mayələr üçün 2000 və 3000 arasında qiymət alır. Qanın damarlarda hərəkəti bəzi halları nəzərə almamaqla laminar hesab olunur. Qan ürəyin sol mədəciyindən aortaya daxil olduda arteriyalarda damarların budaqlanma hissələrində və damarların daralma yerlərində (tromb yarananda) axın turbulent olur. Turbulent axın əlavə enerji tələb etdiyindən ürəyin əlavə yüklənməsinə səbəb ola bilər. Turbulent axın zamanı yaranan küy xəstəliklərin diaqnozu üçün istifadə oluna bilər. Əgər yuxarıdakı düsturda $Re = 2000$ və aortanın diametrini 2 sm qəbul etsək qanın turbulent axını üçün $v_{krit.} = 38 \text{ sm/san}$ alırıq.

Qan təzyiqinin Reva-Rokki üsulu ilə klinikalarda qan təzyiqinin qansız ölçülməsi üsulundan istifadə edilir [2]. Arteriya kənarında onda qanın hərəkəti dayanana kimi sıxılır. Bu kənar təzyiq elə qanın arteriyadakı təzyiqi qədər olur. Arteriyanın tam sıxılması heç bir səsə müşayiət olunmur. Qolu əhatə edən manjetin təzyiqi azaldıqca əvvəlcə maksimal sistolik təzyiqə uyğun olan aşağı səs tonları eşidilir. Təzyiqin sonrakı azalmasında səs tonlarına küylər də əlavə olunur ki, bunlar da arteriyanın manjetlə sıxılmış hissəsində qanın turbulent axınının göstəricisidir.

Puazeyl qanunu. Real (özlülüyə malik) mayələrin boruda hərəkəti zamanı potensial enerji sürtünmə qüvvələrinə qarşı görülən işə sərf olduğundan mayenin təzyiqi boru boyunca azalır. Sabit en kəsikli silindrik boruda real mayenin stasionar laminar axını üçün Hagen-Puazeyl düsturu doğrudur:

$$\Delta P = \frac{8\eta l}{\pi R^4} Q \quad (14)$$

Burada $\Delta P = P_1 - P_2$ borunun uclarındaki təzyiqlər fərqi, R – maye axan borunun daxili radiusu, η – dinamik özlülük, l – borunun uzunluğu, Q – borunun en kəsiyindən vahid zamanda axan mayenin həcmidir.

Hidravlik müqavimət. Bilidiyimiz kimi, sadə elektrik dövrəsi hissəsi üçün Om qanunu

$$U = R_n I$$

düsturu ilə verilir ifadə olunur. Burada U naqilin uc nöqtələrinin potensialları arasındakı fərq (gərginlik), R_n – naqil materialının xüsusi müqavimətindən və ölçülərindən asılı olan müqaviməti, I isə cərəyan şiddəti və ya naqilin en kəsiyindən vahid zamanda keçən elektrik yükünün miqdarıdır. Əgər son iki düsturda borunun uclarındakı təzyiqlər fərqi naqilin uclarındakı gərginlik ilə, borunun en kəsiyindən vahid zamanda axan mayenin həcmi isə naqilin en kəsiyindən vahid zamanda keçən elektrik yükünün miqdarı ilə müqayisə etsək, onda

$$R_{hid.} = \frac{8\eta l}{\pi R^4} \quad (15)$$

yaza bilərik. (15) düsturundakı $R_{hid.}$ kəmiyyəyi mayenin hidravlik müqaviməti adlanır. Onda (14) Puazeyl qanunu aşağıdakı kimi də verilə bilər.

$$\Delta P = R_{hid.} Q \quad (16)$$

Sonuncu düsturdan görünür ki, damarlarda qan təzyiqinin dəyişməsi qanın həcmi sürətindən və damarın radiusundan asılıdır. (13) dusturundan hesablamaq olar ki damar radiusunun 20% azalması təzyiqin iki dəfədən çox artmasına səbəb olur.

Yuxarıdakı düsturdan (15) görünür ki, damarların müxtəlif hissələrində hidravlik müqavimət müxtəlifdir.

$$R_{hid.aorta} : R_{hid.arte} : R_{hid.kap.} \approx 3000 : 500 : 1$$

Hidravlik müqavimət damarın radiusu ilə tərs mütənəsis olduğundan

$$R_{hid.kap.} > R_{hid.arte.} > R_{hid.aorta}$$

Damarlarda hidravlik müqavimətin hesablanması üçün budaqlanma hissələrində damarların paralelliyi də nəzərə alınmalıdır. Yəni *ekvivalent hidravlik müqavimət* aşağıdakı düsturla hesablanıla bilər

$$\frac{1}{R_{hid.ek.}} = \frac{1}{R_{hid.1}} + \frac{1}{R_{hid.2}} + \dots + \frac{1}{R_{hid.N}} \quad (17)$$

İnsan bədənində kapilyar damarların en kəsiklərinin ümumi sahəsi aortanın en kəsiyi sahəsindən təqribən 500 dəfə böyükdür. Onda axının kəsilməzlik tənliyindən (2) qanın xətti sürəti üçün

$$v_{kap.} \approx v_{aorta}/500$$

Kapilyarlarda eritrositlərin hərəkət sürəti $v_{kap.} \approx 1$ mm/s-dir. Kapilyar sistemində qan və toxumalarda maddə mübadiləsi eritrositlərin yavaş hərəkətinə görə mümkün olur.

Ürəyin əlavə yüklənməsi. Damar radiusunun kiçik qiymətlərində ürəyin aortaya vurduğu qanın həcmi (14) düsturuna görə azalır. Nəticədə, damarlara normal qan həcmi bərpa edilməsi üçün ürək əlavə iş görməyə məruz qalır, yəni əlavə yüklənir. Sadə hesablamaya görə, damarın daxili radiusu 3 dəfə azalarsa, qanın həcmi (14) düsturuna görə 81 dəfə azalır. Yəni normal qan həcmi təmin olunması üçün ürəyin sol mədəciyi vahid zamanda 81 dəfə çox sıxılmaya məruz qalmalıdır.

Damarlarda orta təzyiğin paylanması. Ürəyin sol mədəciyi yığıldıqda aortada qan təzyiqinin rəqsləri müşahidə olunur. Təzyiğin orta qiyməti aşağıdakı tənliklə verilir [7]

$$P_{or.} = \frac{2}{3}P_d + \frac{1}{3}P_s \quad (18)$$

burada P_d və P_s uyğun olaraq qan təzyiğini diastola və sistola müddətindəki qiymətləridir. Orta təzyiğin qan damarları boyunca düşməsi Puazeyl qanunu (14) ilə təhlil oluna bilər. Qan ürəkdən $P_{or.}$ orta təzyiği ilə çıxır. $Q = \text{Konstant}$ və

$R_{hid.kap.} > R_{hid.arte.} > R_{hid.aorta}$ olduğundan $\Delta P_{kap.} > \Delta P_{arte.} > \Delta P_{aorta}$ olar. Geniş damarlarda orta təzyiğin düşməsi təqribən 15% olduğu halda, xırda damarlarda 85% olur. Bu isə o deməkdir ki, ürəyin sol mədəciyinin qanı qovmaq üçün sərf etdiyi enerjisinin çox hissəsi xırda damarların payına düşür.

Qaz emboliyası. Mayenin kapilyar boruda hərəkəti zamanı onun isladan və islatmayan olmasından asılı olaraq menisk xətti çökük və qabarıq olur. Həmin əyri səth altında yaranan əlavə təzyiqlik Laplas təzyiqliki adlanır və mayenin səthi gəriməsindən asılıdır[7]:

$$P_L = \frac{2\sigma}{r} \quad (19)$$

burada σ – səthi gərilmə əmsalı, r - meniskin əyrilik radiusudur. Göründüyü kimi, əlavə təzyiqlik kilyarda qan səthinin əyrilik radiusu ilə tərs mütənəsidir.

Kapilyara qaz qabarcığı düşdükdə bu qabarcıq deformasiya edir (sferiklikdən çıxır): bir tərəfdə əyrilik radiusu kiçilir və böyük təzyiqlik qanın hərəkətinə mane olur, hətta qanın hərəkəti dayanır.

NƏTİCƏLƏR

Yuxarıdakılar əsasında aşağıdakı nəticələrə gəlmək olar:

Damar və eritrositlərin ölçüləri nisbətindən asılı olaraq damarlarda qanın axma rejimi və təzyiğini paylanması dəyişilə bilər. Qanın sürəti damarların elastik xassələrindən asılıdır. Özlülük bir çox xəstəliklərin göstəricisidir. Kapilyarlarda təzyiğini düşməsi böyük damarlarda olduğundan çoxdur. Laminar axının sürəti damarın radiusunun funksiyasıdır.

ƏDƏBİYYAT

1. *Davidovits P.* Physics in Biology and Medicine Third Edition. Academic Press of Elsevier, 2008, p.270
2. *Kukurova E. et. al.* Basics of Medical physics and biophysics for electronic education and health professionals Askleptos, Bratislava, 2013, 214 p., ISBN 978-80-7167-177-0
3. *Lavence B.* What is Atherosclerosis-NHLBI NIH 2016. Retrived, 6 November, 2017
4. *Topol E.J., Califf R.M.* Textbook of Cardiovascular Medicine ISBN 9780781770125, 2007
5. *Антонов В.Ф., Козлова Е.К., Черныш А.М.* Физика и биофизика. Москва: Геотайп-Медиа, 2013, 468 с.
6. *Ливенцев Н. М.* Курс физики. Москва: Высш. Школа, 1978, 356 с.
7. *Ремизов А. Н., Максина А. Г. Потапенко А. Я.* Медицинская и биологическая физика. М.: Дрофа, 2003, 558 с.

Redaksiyaya daxil olub 21.02.2020