

Всероссийский симпозиум, посвящённый обсуждению проблем биомеханики  
49-я ежегодная встреча механиков и физиологов  
Институт механики МГУ, Институт физиологии им. И. П. Павлова РАН  
(г. Москва, 17-18 февраля, 2022 г.)

**СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ КРОВЕНОСНЫХ СОСУДИСТЫХ СЕТЕЙ:  
ФЕНОМЕН СВЕРХТЕКУЧЕСТИ КРОВИ (В ПРЕДЕЛЬНОМ  
СМЫСЛЕ), УСЛОВИЯ ЕГО ВОЗНИКНОВЕНИЯ, АБСОЛЮТНАЯ  
НЕОБХОДИМОСТЬ СУЩЕСТВОВАНИЯ  
(МИКРОЦИРКУЛЯТОРНЫЙ АСПЕКТ) И МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ  
ПРОЯВЛЕНИЯ IN VIVO, «КВАНТОВАЯ» (ПАРЦИАЛЬНАЯ,  
ДИСКРЕТНАЯ) ГЕМОДИНАМИКА, АКСИОМАТИКА И  
МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АППАРАТ, МОЛЕКУЛЯРНЫЕ  
НАНОМАШИНЫ И МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ  
ТРАНСКАПИЛЛЯРНЫМ ОБМЕНОМ ВЕЩЕСТВА И ЭНЕРГИИ  
С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ ИСТОРИЧЕСКИМИ ЭКСКУРСАМИ,  
ЗАМЕЧАНИЯМИ И СПРАВКАМИ**

**Профессор Глотов В. А.**

**ФГБОУ ВО «Смоленский государственный медицинский университет»  
Минздрава России  
Кафедра анатомии человека**

**Препринт доклада**

*Посвящается светлой памяти академика РАМН  
Василия Васильевича Куприянова  
и профессора Сергея Аркадьевича Регирера*

*Ремарка*

*Один из самых больших грехов на Земле – грех неблагодарности.*

*Научная Судьба автора висела на волоске: интеллектуальный вакуум вокруг, полное непонимание того, чем он занимается, внезапно развившаяся вследствие ретробульбарного неврита слепота и враждебность окружающего профессионального сообщества.*

*Но автор упрямо и настойчиво шёл на пролом. На карту было поставлено всё. Как теперь представляется, только вмешательство Мудрого Отца и Его Ангелов в лице сначала Сергея Аркадьевича, а потом Василия Васильевича, вырвало его из бездны, куда он стремительно погружался.*

*Звёзды наконец сошлись. Всё разрешилось в апреле 2002 г., когда, после восстановления зрения, при поддержке двух других Ангелов в лице профессора Александра Агубечировича Хадарцева, председателя диссертационного*

*совета и профессора Александра Евдокимовича Доросевича, директора Смоленского областного Института Патологии (скоростижно скончался 10 февраля 2022 г.), автор защитил докторскую диссертацию сразу, минуя учёную степень кандидата наук.*

*Автор и его верный друг мама (скончалась 11 марта 2021 г.) всегда хранили и хранят в своём сердце искреннюю благодарность этим людям.*

## Увертюра

### 1

В 1937 г. П. Л. Капица при постановке тонких и изящных экспериментов обнаружил феномен сверхтекучести жидкого гелия при температурах ниже 2,19°К: вязкость гелия при протекании через тонкие капилляры и щели оказалась настолько меньше вязкости самой маловязкой жидкости, что её нужно считать равной нулю.

Статья с описанием результатов эксперимента объёмом всего в одну страницу была опубликована в журнале «Nature» [Kapitza P. Viscosity of liquid helium below the  $\lambda$ -point // Nature. - 1938. - Vol. 3558, № 141. - P. 74].

Через 40 лет в 1978 г. Нобелевский комитет присудил П. Л. Капице Нобелевскую премию по физике «за фундаментальные открытия и изобретения в области физики низких температур». Эти экспериментальные результаты не могли быть объяснены в рамках существовавших тогда классических физических представлений и стимулировали развитие физики квантовых жидкостей.

В 1941 г. Л. Д. Ландау, работавший вместе с П. Л. Капицей, создал кватомеханическую теорию сверхтекучести гелия, которая полностью объяснила полученные экспериментальные результаты [Ландау Л. Д. Journ. Phys. USSR, 5, 71 (1941); ЖЭТФ, 11, 592 (1941)]. Это был триумф квантовой механики. В 1962 г. Нобелевский комитет присудил Л. Д. Ландау Нобелевскую премию по физике «за новаторские теории конденсированных сред, в особенности жидкого гелия».

В курсе лекций лауреата Нобелевской премия по физике 1965 г. «за фундаментальные работы по квантовой электродинамике, имевшие глубокие последствия для физики элементарных частиц» Р. Фейнмана [Фейнман Р. Статистическая механика. Курс лекций. Пер. с англ. Н. М. Плакиды и Ю. Г. Рудого. Под ред. проф. Д. Н. Зубарева. – М.: Мир, 1978. – Изд. 2-е. – С. 355-401] можно найти наиболее полный обзор современного состояния проблемы сверхтекучести, написанный с некоторой скрытой ревностью к Л. Д. Ландау.

### 2

В 1920 г. Нобелевский комитет присудил Нобелевскую премию по физиологии и медицине «за открытие механизма регуляции просвета капилляров» датскому физиологу, цыганского происхождения Шек Августу Стинберг Крогу [Крог А. Анатомия и физиология капилляров. – М.: Изд-во Мосздраводела, 1927].

Это был триумф: анатомия и физиология кровеносной сосудистой системы из важных, но в определённой степени второстепенных абстрактных теоретических вспомогательных медицинских дисциплин с иллюстративными приложениями гидродинамики и гидравлики к гемодинамике выделилась в фундаментальную научную проблему, равновеликую многим физическим проблемам, имеющую первостепенное, в том числе и мировоззренческое, значение для понимания сложно организованной совершенной кровеносной системы и феномена жизни, возникших в органическом мире. Фундаментальные исследования и идеи Августа Крога не потеряли свежести и актуальности до настоящего времени.

В 1959 г., пройдя весьма драматические перипетии, вышел в свет гениальный фундаментальный труд Александра Леонидовича Чижевского, написанный в самый трагический период его жизни, когда он находился в заключении по надуманному и сфальсифицированному обвинению, «Структурный анализ движущейся крови» [Чижевский А. Л. Структурный анализ движущейся крови. – М.: Издательство Академии наук СССР, 1959. – 474 с.]. Этот высококвалифицированный и высокопрофессиональный фундаментальный труд на многие десятилетия, опередивший своё время, до сих пор не получил должного осмысления и оценки профессиональным научным сообществом. Без понимания и усвоения проблематики этой книги вообще невозможно движение вперёд в области фундаментальной гемодинамики.

А. Л. Чижевский рассматривал гемодинамику как «учение о сложном волновом движении полидисперсных суспензий с несферической формой дисперсной фазы в разветвляющихся эластических трубках» [- С. 236].

«Законы гидродинамики, объясняющие движения жидкости в трубах, могут дать лишь приближенную и общую основу для суждения о движении крови в кровеносных сосудах. Эти законы только с известным ограничением применимы к явлениям, протекающим в сердечно-сосудистой системе. Кровь, будучи жидким телом, имеет некоторое существенное отличие от жидкостей, движение которых характеризуется основными уравнениями гидродинамики. Кровь является взвесью клеточных элементов: эритроцитов, тромбоцитов, лейкоцитов, а также белковых мицелл и жировых эмульсий. Истинный суммарный объём эритроцитов по отношению к общему объёму крови в норме составляет 31,5%. Эти тела, обладающие известной степенью упругости, несколько видоизменяют общие черты, свойственные движению гомогенных жидкостей по трубам. Объём эритроцитов и их форма играют в этом отношении определяющую роль» [- С. 237].

«Кровь пришла к своему современному состоянию путём длительной биологической эволюции, совершенствуясь одновременно с развитием органического мира... Кровь человека должна обладать стройной физической и геометрической организацией, ибо в органическом мире более устойчивые состояния являются в то же время и более вероятными. В кровяном русле должны непрерывно действовать антихаотические факторы, дабы предохранять его от постоянной тенденции к переходу в термодинамически равновесное состояние, от выравнивания химических и электрических потенциалов, т.е. кровяное русло должно быть в высокой мере упорядочено геометрически, физически и химически» [- С. 13].

На Первом Международном Конгрессе по биофизике и космической биологии в сентябре 1939 г. в Нью-Йорке Александр Леонидович Чижевский (1897-1964) единогласно был избран Почетным президентом конгресса (заочно). Как признанного ученого, изобретателя, поэта, философа и художника его удостоили титула «Леонардо да Винчи XX века». На этом же конгрессе А. Л. Чижевский был выдвинут группой выдающихся ученых с мировым именем на Нобелевскую премию в области физиологии и медицины. В Нобелевский комитет от имени конгресса был направлен меморандум о научных трудах А. Л. Чижевского. В связи с развёрнутой в этот период в СССР мощной кампанией по дискредитации А. Л. Чижевского как учёного (при участии известных и уважаемых советских учёных) процедура номинирования по политическим причинам не была завершена, и Россия потеряла очередную Нобелевскую премию.

## Безумная идея

*В Смоленске есть областная психиатрическая лечебница для душевно больных, которую в народе называют по географической принадлежности «Гедеоновкой». Это бывшее имение Гедеоновка (Богданово).*

*Когда человек высказывает какую-то необычную или парадоксальную мысль или идею, то в Смоленске такого человека медики в шутку называют «наш товарищ из Гедеоновки» или «пациент из Гедеоновки».*

*Позволим себе высказать мысль, которая коллегами из профессионального сообщества может быть воспринята как навязчивая сверхценная идея пациента из Гедеоновки.*

***В неорганическом мире*** в экстремальных условиях при температуре близкой к абсолютному нулю некоторые простые неорганические вещества, такие как, например, <sup>4</sup>He могут при определённой скорости движения протекать по тонкому капилляру с нулевой вязкостью, без сопротивления, т.е. без потери импульса и энергии. Этот феномен сверхтекучести гелия представляет из себя макроскопическое проявление квантовомеханических эффектов.

А если поставить вопрос так: ***«Возможно ли в органическом мире при определённых оптимальных условиях, а именно: при температуре человеческого тела, при определённых волновых характеристиках потока крови; при определённой конструкции, конфигурации и геометрических параметрах соответствующих отделов кровеносных сосудистых сетей; при определённых наномолекулярных функциональных свойствах клеточной поверхности эндотелия, соприкасающейся с поверхностью потока крови; биофизических и функциональных характеристиках сосудистой стенки в целом в соответствующих отделах кровеносных сосудистых сетей; при определённых биофизических характеристиках потока крови (плотность, коэффициент динамической вязкости, коэффициент поверхностного натяжения, скорость потока, полное давление); при определённом клеточном и химическом (в самом широком смысле) составе крови, появление феномена сверхтекучести крови (в предельном смысле), т.е. при определённой скорости движения кровь может протекать по тонкому кровеносному капилляру с нулевой вязкостью, без сопротивления, т.е. без потери импульса и энергии, либо, другими словами, с потерей импульса и энергии в пределах столь малых величин, что они физически и биологически незначимы для кровеносных сосудистых сетей и организма в целом?»***

Пролог

Поединок

В 1989 г. автором этого доклада были направлены две статьи в редакцию журнала «Биофизика» под названием «Правила Ру и конфигурации сосудов микроциркуляторного русла» и «О кинематической вязкости крови в сосудах микроциркуляторного модуля». В статьях была предпринята попытка объяснения не соблюдения правил Ру для конфигураций микрососудистых бифуркаций при помощи гипотезы о квантовом (парциальном) характере гемодинамики через бифуркацию и показано влияние закона сохранения импульса и вязкости движущейся крови на конфигурации сосудистых бифуркаций. В этих статьях уже присутствовал в неявной форме сформулированный выше безумный вопрос.

Спустя какое-то время на имя автора пришло письмо из редакции журнала с рецензией и заключением Сергея Аркадьевича Регирера. Из рецензии объемом в полстраницы следовало, что автор некорректно использует физические понятия и термины, и скорее является пациентом из Гедеоновки с навязчивыми сверхценными идеями (это авторская интерпретация смысла рецензии), чем специалистом в этой сложной и тонкой области, и статьи должны быть безусловно отклонены.

Автор тогда даже не представлял со специалистом какого уровня он имеет дело. С этого момента началась достаточно длительная история отношений автора с Сергеем Аркадьевичем Регирером. Это был, в некотором роде, интересный научный поединок двух джентльменов. Такое резкое заключение фактически обнуляло огромную интеллектуальную и экспериментальную работу, сделанную автором статьи, начиная с 1976 года, с того самого момента, когда он стал студентом первого курса лечебного факультета Смоленского государственного медицинского института.

Будучи жертвой советской системы образования и воспитания нового человека, Детской энциклопедии, журналов «Квант», «Природа», «Юный техник», «Юный натуралист», «Техника – молодёжи», «Химия и жизнь», «Наука и жизнь», «Знание – сила» научно-популярной серии «Эврика», смертельно заражённый романтикой научного поиска, которую культивировал социалистический реализм, будь они не ладны, обременённый успешным опытом участия в школьных, районных и областных олимпиадах по математике, физике, химии и биологии, автор сразу же, после поступления в институт, стал искать возможность удовлетворять свою одержимость в получении интеллектуального удовольствия от решения сложных и интересных научных задач. С ранней юности ему хотелось заниматься научными исследованиями на стыке математики, физики, химии и биологии. Только медицина, дававшая право на фундаментальный доступ к тайнам человеческого тела, «заточенная» на реальную практическую деятельность, давала такую возможность.

Уже в первой своей самостоятельной научной работе выполненной на первом курсе института в студенческом научном кружке при кафедре анатомии человека, посвященной строению микрососудистого русла накости длинных трубчатых костей человеческих плодов, автор самостоятельно сформулировал *проблему конфигурации сосудистой бифуркации*, занимавшую умы огромного числа выдающихся учёных, начиная с Вильгельма Ру [Roux W. Ueber die Verzweigungen der Blutgefäße. Eine morphologische Studie. //Z. Naturwissenschaft. – 1878. – Bd. 12. – S. 205-266] (XIX век), который впервые сформулировал эту проблему и предложил её качественно-полуколичественное решение (знаменитые **правила Ру**) и кончая С. D. Murray [Murray C. D. The physiological principle of minimum work. I. The vascular system and the cost of blood volume. //Proc. N.A.S. – 1926. – Vol. 12. – P. 207-214; Murray C. D. The physiological principle of minimum work. II. Oxygen exchange in capillaries. // Proc. N.A.S. – 1926. – Vol. 12. – P. 299-304; Murray C. D. The physiological principle of minimum work applied to the angle of branching of arteries. //Journal of General Physiology. – 1926. – Vol. 9. – N. 6. – P. 835-841], который получил наилучшее (*само собой разумеется, до работ автора*), количественное решение этой проблемы.

С момента публикации статей С. D. Murray в 1926 г. появились тысячи научных работ, развивающих различные аспекты применения *принципов «минимальной работы»*,

*«минимальных затрат», оптимальности, фрактальной геометрии к конструкции сосудистых разветвлений и функционированию кровеносной сосудистой системы и гемодинамики в целом. Создался огромный информационный пул из правдоподобных рассуждений, которые сильно усложнили и затуманили понимание этой проблемы и устремили научную мысль вперёд замысловатыми, извилистыми и часто затейливыми путями, многие из которых оказались тупиковыми и до сих пор не дали по-настоящему серьёзных результатов.*

Автор ещё раз критически проанализировал свои результаты и полученный отзыв, и вновь отослал в редакцию журнала «Биофизика» свою статью вместе с полученным отзывом и сопроводительным письмом следующего содержания:

«Глубокоуважаемая редакция журнала «Биофизика»!

Получив Ваше заключение по поводу статей «Правила Ру и конфигурации сосудов микроциркуляторного русла» и «О кинематической вязкости крови в сосудах микроциркуляторного модуля», автор был весьма огорчён столь категоричными отзывами о них уважаемого С. А. Регирера, который, по сути дела, лёгким росчерком пера перечеркнул результаты многолетней работы автора. Автор был тем более огорчён, что доводы, на основании которых уважаемый рецензент сделал своё заключение, совершенно не убедили автора в ошибочности его подхода к некоторым структурным аспектам сосудистых бифуркаций МЦР и результатов вышеуказанных статей, а также в его некомпетентности и несостоятельности.

Разберём эти доводы по порядку.

Итак, в отзыве на статью «Правила Ру и конфигурации сосудов микроциркуляторного русла» уважаемый рецензент указывает: «...автор использует неконтролируемые и неопределённые понятия вроде «квант крови», «кинематическая вязкость в сосуде» и т. п.».

Автору известно отношение уважаемого рецензента к чрезмерному упрощению на основе ложного представления о простоте проблемы применения механики к системе кровообращения, а также к элементам «кустарщины», терминологической неряшливости и многому другому, что «часто встречается в сочинениях, трактующих применение механики в биологии», что у уважаемого рецензента вызывает «справедливое раздражение, а у неопита – устойчивые заблуждения» [см. «Предисловие редакторов перевода» (С. Регирер, В. Хаютин) к книге Каро К. и др. «Механика кровообращения». – М.: Мир, 1981. – С. 6].

Применив термин «квант крови», автор не нарушил принцип Оккама: «Сущностей не следует умножать сверх необходимостей», - или: «Не следует делать посредством большего то, что можно достичь посредством меньшего» [Лем С. Сумма технологий. – М.: Мир, 1968. – С. 546-548]. В выше указанной книге «Механика кровообращения» в гл. I «Частицы и сплошные среды» на с. 18 введены понятия «элементарный объём» или «частица жидкости». Термин «квант (порция) крови» автором употребляется в этом смысле.

Однако, рассматривая движение крови через сосудистую бифуркацию МЦР не как непрерывный поток жидкости (рис. 1), а как непрерывный поток «элементарных объёмов», или «частиц жидкости», или «квантов (порций) крови», или «псевдочастиц» (рис. 2), и рассматривая их поведение в области бифуркации как распад, автор считает, что применение термина «квант (порция) крови» в данном случае наиболее приемлемо. Для специалиста очевидно, что «квант (порция) крови» не имеет никакого отношения к планковским квантам и квантовой механике вообще. Применение здесь другого термина (синонима) лишь запутывало бы вопрос.

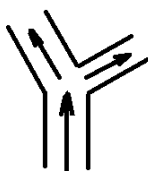


Рис. 1.

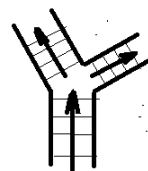


Рис. 2.

Что касается выражения «кинематическая вязкость в сосуде», то при внимательном прочтении статьи такого выражения обнаружить не удаётся. На с. 4 статьи встречается выражение «кинематическая вязкость жидкости», «кинематическая вязкость крови в  $i$ -м сосуде бифуркации», «кинематическая вязкость крови», что не одно и то же с выражением, цитируемым рецензентом. Эти термины, по мнению автора, вполне корректны. Из любого учебника по гидродинамике известно, что оценка вязкости жидкости возможна через отношение  $\eta/\rho$ , где  $\eta$  - динамическая вязкость жидкости, а  $\rho$  - плотность жидкости. Это отношение называют кинематической вязкостью  $\nu$  [см., например, Киселёв П. Г. Гидравлика. Основы механики жидкости. – М.: Энергия, 1980. – С. 131].

Далее уважаемый рецензент указывает, что «запись закона сохранения импульса в форме (4) вообще неверна, поскольку на кровь действуют силы со стороны сосудистой стенки».

$$m_1 v_1 = m_2 v_2 + m_3 v_3,$$

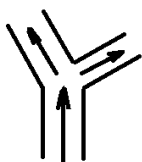
$m_i$  – масса кванта крови в  $i$ -м сосуде узла ( $i=1, 2, 3$ );  $v_i$  – вектор скорости кванта крови в  $i$ -м сосуде.

Автор не согласен с этим утверждением. При биомикроскопии, наблюдая движение крови через бифуркацию, в определённый момент времени в каждом из трёх сосудов бифуркации кровь имеет определённое значение скорости (т.к. в системе МЦР движение крови ламинарное, то имеется в виду средняя по сечению скорость). Величина скорости движения крови и масса кванта крови складываются под влиянием действия сил со стороны сосудистой стенки и детерминируются ими (в определённой степени). Стоит этим силам измениться, изменятся и значения величины скорости движения и массы кванта крови, поэтому запись закона сохранения импульса для распада кванта (порции) крови в бифуркации в форме (4) верна. Есть объективный критерий, подтверждающий правильность рассуждения автора.

На основе выражения (4) получена система уравнений (7), которая связывает кинематическую вязкость крови в сосудах бифуркации со структурными параметрами этой бифуркации. Эмпирически найденная система уравнений (1) является лишь частным случаем системы уравнений (7) и справедлива только для артериальных бифуркаций. На основе анализа системы (7) можно получить ряд заключений о некоторых структурных свойствах сосудистых бифуркаций МЦР (см. с. 5 статьи), а опытная проверка наличия этих свойств в природе на препаратах МЦР показала их реальное существование во всех бифуркациях без исключения. Автор полагает, что это является веским аргументом в правильности выражения (4).

Далее уважаемый рецензент указывает: «Рассуждения статьи приводят к бессодержательным результатам, если перейти к частному случаю  $v_3=0$  (пережата одна ветвь); при  $d_1/d_2$  получится, что либо «кинематические вязкости» различны, либо  $v_1= v_2$ . И то, и другое лишено физического смысла».

Автор указывает, что этот довод уважаемого рецензента несостоятелен, т.к. при  $v_3=0$  бифуркация вырождается как морфологический объект, она исчезает и на её месте остаётся сосуд со стенкой неправильной формы в области бывшей бифуркации (рис. 3).



Бифуркация до пережатия ветви



Сосуд после пережатия ветви

Рис. 3.

Выражение (6) справедливо только для бифуркации, при пережатии ветви бифуркация исчезает и, следовательно, применение этого выражения некорректно.

Приведенные контрдоводы, по мнению автора, обоснованно указывают на поверхностную экспертизу статьи уважаемым рецензентом. Автор настаивает на проведении повторной экспертизы этой статьи. Автор готов к любым категорическим заключениям по поводу его работы, но более глубоко обоснованным и по существу проблемы, затронутой в статье. В данном случае речь идёт не о задетом самолюбии автора, а о том, чтобы найти истину, ибо автор не может позволить себе роскоши так легко отказаться от результатов долгих размышлений о процессах, происходящих в области бифуркаций сосудов МЦР только лишь на основании поверхностных доводов уважаемого эксперта.

В отзыве на статью «О кинематической вязкости крови в сосудах микроциркуляторного модуля» уважаемый рецензент (по-видимому С. А. Регирер – нет подписи) указывает, что автор цитирует неопубликованную работу [1].

Уважаемому рецензенту, по-видимому, известно, что с 1990 г. снят ограничительный гриф «Для служебного пользования» с периодических информационных изданий ВНТИЦ – «Сборников рефератов НИР и ОКР» и «Бюллетеней регистрации НИР и ОКР». Авторы получили право ссылаться и цитировать официальные отчёты о НИР и ОКР без дополнительного разрешения ВНТИЦ в открытой печати. Автор воспользовался этим правом.

Далее уважаемый рецензент указывает, что в статье «высказываются некорректные утверждения о «кинематической вязкости в сосудах, - величине, смысл которой не разъяснён».

Автор ещё раз указывает, что выражения «кинематическая вязкость в сосудах» в статье не употребляется. В обеих статьях речь идёт о кинематической вязкости крови. Термин «кинематическая вязкость» общеизвестен.

Утверждение уважаемого рецензента о том, что «выводы (последний абзац на стр. 3) невозможно перевести на язык, принятый в механике кровообращения» автор считает необудительным.

В статье получены уравнения, связывающие величины вязкости крови в каждом из трёх микрососудов бифуркации МЦР со структурными параметрами этой бифуркации, позволяющие рассчитать величины кинематической вязкости крови в микрососудах бифуркации, если известны её структурные параметры и величина кинематической вязкости крови хотя бы в одном микрососуде бифуркации. Этот результат позволяет подойти к пониманию законов управления движением крови в системе МЦР. Вызывает удивление, как столь уважаемый и опытный рецензент просмотрел этот важный результат.

Автор считает, что статья рассмотрена уважаемым рецензентом поверхностно и небрежно, и настаивает на повторной экспертизе статьи.

С уважением.

Глотов В. А.  
2 сентября 1990 г.»



Прошёл почти год. Из редакции журнала не было никаких известий. И вот наконец в конце 1991 г. автор получает второе письмо из редакции журнала «Биофизика» с заключением Сергея Аркадьевича Регирера:

«Возражения рецензента к статье в основном правильные, но всё же нельзя сказать, что статья неверная. Скорее она неряшливо написана и забывает интересные мысли нечёткими рассуждениями. Действительно, кровь не течёт по сосудам порциями, между которыми есть промежутки заполненные (воздухом? – но это эмболия). Тем не менее можно, мысленно выделить объём жидкости в сосуде, посмотреть, что с ним происходит. На него действуют силы со стороны стенки сосудов, поэтому законы сохранения импульсов их не учитывающие, не верны! Но если мы можем удовлетворить закону сохранения импульса без учёта реакции стенок сосудов, то это, может быть? улучшает условия работы сосудов и является добавочным фактором, препятствующим возникновению турбулентности. Статья может быть опубликована только после полной переработки».

«12.06. 1991.

Глубокоуважаемый автор!

Редакция журнала «Биофизика» возвращает Вашу статью и просит исправить её согласно рекомендациям рецензента.

Заведующая редакцией».

«Глубокоуважаемая редакция!

Автор благодарит Вас за то, что Вы нашли возможным повторно рассмотреть его статьи «Правила Ру и конфигурации сосудов микроциркуляторного русла» и «О кинематической вязкости крови в сосудах микроциркуляторного модуля».

Автор также благодарит рецензента за объективность и непредвзятость при рассмотрении статей. Автор удовлетворён отзывом №2 и согласен с замечаниями рецензента.

Автор направляет исправленную статью согласно рекомендациям рецензента: редакцию указанных выше статей, объединённых в одну, под названием «Правила Ру и конфигурации микрососудистых бифуркаций».

Дополнительно автор сообщает, что по материалам двух вышеуказанных статей была оформлена заявка на изобретение, зарегистрированная 5.06.90. за №4834487/14 (62475) под названием «Способ определения кинематической вязкости крови в сосудах микроциркуляторного модуля», на которую получено положительное решение от 22.04.91.

Автор Глотов В. А.»

«12.06. 1991.

Глубокоуважаемый автор!

Статья «Правила Ру и конфигурации микрососудистых бифуркаций» намечена к публикации в выпуске журнала «Биофизика» за 1992 г.

Направляя подготовленный к набору оригинал статьи, редакция просит тщательно выверить текст, проверить рисунки и сверить их соответствие с подписями к рисункам. Проверочный и исправленный текст и рисунки пописать «в печать» и расписаться (в тексте – в верхнем правом углу, на рисунках – на обороте).

Все исправления, дополнения и подписи делать только простым карандашом.

Статью необходимо вернуть в редакцию как можно быстрее!

Заведующая редакцией».

В 1992 г. в журнале «Биофизика» опубликована статья автора на русском и английском языках [Глотов В. А. Правила Ру и конфигурации микрососудистых бифуркаций. //Биофизика. – 1992. – Т. 37. – Вып. 2. – С. 341-344; Gotov V. A. The Roux rules and the configurations of microvascular bifurcations. //Biophysics (Pergamon Press Ltd). – 1992. – Vol. 37. – N.2. – P. 265-268].

«Развалинами Берлина удовлетворён!», - как говорил капитан Титаренко (актёр и режиссёр Леонид Быков) из фильма «В бой идут одни «старики»», появилась «легкость необыкновенная в мыслях» и уверенность в правильности выбранного направления дальнейших исследований...

«Уважаемый д-р Глотов!

Спасибо за книгу [Глотов В. А. Структурный анализ микрососудистых бифуркаций. (Микрососудистый узел и гемодинамический фактор). – Смоленск: АО "Амипресс", 1995. – 253 с.], которая досталась мне как рецензенту. О её выходе я знал, но ещё не побеспокоился о добытии.

Конечно же, печатать статью [Глотов В. А. «Принцип симметрии Кюри и конфигурации сосудистых бифуркаций, их симметрия и асимметрия, классификация, энантиоморфизм сосудистых сетей»] после выхода книги нет смысла; об этом я сообщаю в редакцию [Здесь речь идёт о статье, которую автор направил в редакцию журнала «Биофизика». Сергей Аркадьевич вновь стал рецензентом статьи автора в этом журнале. В рецензии было сделано ряд замечаний, насколько автору не изменяет память, по некоторым формулировкам, которые рецензент рекомендовал устранить. Статья могла бы быть опубликована в журнале «Биофизика», если бы целиком не вошла в монографию автора].

Относительно Вашего письма, написано с явным оттенком ехидства (это не выражение обиды, а только констатация), могу сказать, что по-настоящему надо было бы Ваши идеи пообсуждать у доски. Если представится возможность оказаться в Москве и будет желание, свяжитесь, пожалуйста, со мной заранее по телефону или E-mail'у.

С лучшими пожеланиями.

С. Регирер  
2.04.96.»

«Глубокоуважаемый Владимир Александрович!

Вторая декада мая, равно как и третья, вполне годятся при условии, что я буду знать о Вашем приезде за несколько дней – чтобы не получилось накладок. Наилучшие дни для обсуждений – четверг и пятница (нет никаких регулярных мероприятий). Самый оперативный способ известить меня о приезде – позвонить домой (433 17 34).

Привозите любые материалы, какие пожелаете, и заранее сообщите, какая техника будет нужна.

Я не предполагал устраивать крупномасштабного обсуждения, а хотел удовлетворить собственное любопытство по части устройства микрососудистого русла и возможностей его формального описания (всё остальное давайте оставим за пределами нашего первого разговора).

Само собой разумеется, что Вы вправе позвать всех, кого захотите. Никаких возражений нет и быть не может.

С лучшими пожеланиями.

С. Регирер  
29.04.1996»

Семинары по биомеханике под руководством С. А. Регирера с обсуждением работ автора состоялись в Институте механики МГУ 14 и 16 мая 1996 г. Первоначально было запланировано три семинара, но состоялось только два. В конце второго семинара Сергей Аркадьевич протянул мне руку и предложил дальше работать вместе. К сожалению, я тогда был молод, самонадеян, зол и нагл, авторитетов не признавал. Я не принял его предложения, о чём очень сейчас сожалею. В следствии моего отказа работать вместе, третий семинар не состоялся, а потом Сергей Аркадьевич умер. Теперь я очень жалею об упущенной возможности поработать вместе с этим выдающимся учёным. Из ныне живущих на тех семинарах была Н. Х. Шадрина. Быть может, она ещё помнит автора.

«Уважаемый д-р Готов!

Спасибо за полезную информацию [Речь идёт об одном из первых научных электронных журналах, учреждённых в России: «Электронном математическом и медико-биологическом журнале «Математическая морфология»» <http://www.sci.rostelecom67.ru/user/sgma/MMORPH/TITL.HTM> (Редактор В. А. Готов. Журнал был учреждён в Смоленске по инициативе и непосредственном участии редактора в 1996 г.)]. Я перешлю ее также некоторым потенциальным читателям журнала.

С лучшими пожеланиями

С. Регирер  
24.06.1999»

«Глубокоуважаемый Сергей Аркадьевич!

25 апреля у меня состоится защита докторской диссертации. Вчера я отправил в Институт механики на Ваше имя свой доклад на отзыв [Готов В. А. Системный анализ морфофункциональных зависимостей в генезе микрососудистых бифуркаций (05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации; 14.00.02 – Анатомия человека). Диссертация в виде научного доклада на соискание учёной степени доктора медицинских наук – Тула, 2002. – 63 с.]. Буду Вам очень признателен, если Вы найдете время на ознакомление с моей работой и возможность дать на нее отзыв.

Желаю Вам всего доброго.

Ваш Владимир А. Готов.

23.03.2002».

Так как события с защитой диссертации развивались стремительно, защита была разовой, по двум специальностям, минуя учёную степень кандидата наук, да ещё и по докладу. Автору не известна реакция С. А. Регирера на эту просьбу. В диссертационный совет, по крайней мере, в период защиты и оформления документов, отзыва от С. А. Регирера не поступало...

**Апофеоз главной темы**

**«Воспоминание о будущем»**

Вот лишь некоторые программные работы (это только «вершина айсберга», этой тематике посвящено около 100 научных работ, изобретений и рационализаторских предложений, а также диссертационных исследований, выполненных под руководством автора), в которых поставленный выше вопрос нашёл своё максимальное выражение:

1. Глотов В. А. Структурный анализ микрососудистых бифуркаций. (Микрососудистый узел и гемодинамический фактор). – Смоленск: АО "Амипресс", 1995. – 253 с.

2. Глотов В. А. Принцип симметрии Кюри и конфигурации сосудистых бифуркаций, их симметрия и асимметрия, классификация, энантиоморфизм сосудистых сетей. – Вестник новых медицинских технологий. – 2000. – Т. VII. – №1. – С. 16-20.

3. Глотов В. А. Функциональная анатомия внутреннего просвета кровеносных сосудистых сетей: роль гемодинамического фактора и сил поверхностного натяжения в его формировании, аксиоматический подход. – Однораловские морфологические чтения: сборник материалов Всероссийской научной конференции с международным участием /ФГБОУ ВО «ВГМУ им. Н. Н. Бурденко» Минздрава России. – М.: Издательство «Научная книга», 2019. – С. 48-54.

Эти разработки стимулировали целый ряд научных проектов:

1. Проект РФФИ №94-04-13544 «Структурный анализ микрососудистых бифуркаций» (Научный руководитель – Глотов В. А.).

2. Проект РФФИ №96-04-50991 «Клеточная и тканевая инженерия эндотелия (формирование в культуре эндотелия *in vitro* функционирующих саморазвивающихся капиллярных сетей)» (Научный руководитель – Глотов В. А.).

3. Проект Фонда Сколково «Универсальная платформа «Франкенштейн» для биофабрикации искусственных тканей и органов» (2015-2018) (Научный руководитель – Глотов В. А.).

Проектов Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере:

4. Проект НТИ-50323 «Разработка платформы на базе микрофлюидного чипа для исследования ангиогенеза *ex vivo*» (Научный руководитель – Глотов В. А., главный конструктор – Жилкин В. В.).

5. Проект НТИ-84017 «Разработка мобильной, автономной, кибернетической, биотехнической платформы для контролируемого получения эффективных популяций свободных эндотелиальных клеток (первичных культур эндотелия) *ex tempore* из эндотелиальной выстилки кровеносных сосудов пупочного канатика человека (Генератор эндотелиальных клеток) для клеточных и тканеинженерных технологий (МАКБП-ГЭК)» (Научный руководитель – Глотов В. А., главный конструктор – Жилкин В. В.).

## **Основная часть**

### **Структурный анализ кровеносных сосудистых сетей (КСС)**

«Структурный анализ уже давно приобрёл исключительное значение в ряде отделов научного знания и, особенно, в кристаллографии, химии, металлургии, технологии волокнистых веществ, химии белков и т.д.

Настало время обратить внимание и на структуру крови, но не в мёртвом состоянии, изъятой из организма, а при её движении по кровеносным сосудам и расширить пределы изучения истинной физиологии крови» [Чижевский А. Л. Структурный анализ движущейся крови. – М.: Издательство Академии наук СССР, 1959. – С. 3].

Если перефразировать известную шутку Марка Твена, то знания, которыми мы не обладаем о кровеносных сосудистых сетях, обширны. В то же время, трудами многих поколений исследователей уже накоплен огромный массив достоверных и правдоподобных сведений о конструкции кровеносных сосудистых сетей (далее - КСС), достаточный для их формализованного структурного анализа с применением математических моделей, основанных на аксиоматическом подходе, позволяющем новые знания об изучаемом объекте выводить аналитически, предсказывать неочевидные и неизвестные до сих пор физиологические и морфологические феномены *in vivo*, а так же показывать пути экспериментальной проверки их существования.

«Построение какой-либо теории мы называем аксиоматическим: если основные понятия и основные гипотезы этой теории ставятся как таковые во главу угла, а дальнейшее её содержание логически выводится из них с помощью определений и доказательств. Аксиоматическими именно в этом смысле слова были построены геометрия Евклида, механика Ньютона, термодинамика Клаузиуса» (Д. Гильберт, П. Бернайс) [Гильберт Д., Бернайс П. Основания математики. Логические исчисления и формализация арифметики. – М.: Наука, 1979. – С. 23.].

И ещё: «Вообще говоря моделями можно пользоваться до определённого момента развития данной области науки. Удачные модели годны для получения отдельных выводов, и срок их жизни определяется тем периодом, пока они не вступают в противоречие с фактами: модели должны строго контролироваться наблюдениями и экспериментами... Тем не менее, для проверки идеи не всегда необходимы визуальные наблюдения какого-либо теоретически мыслимого процесса. Совпадение теоретических выводов с фактами, возможность предсказания явлений на основе теоретических данных, объяснение теорией ранее необъяснимых явлений говорят о ценности теории, как рабочего инструмента» [Чижевский А. Л. Структурный анализ движущейся крови. – М.: АН СССР, 1959. – С. 5].

*Элегия*

**Живое созерцание**



Рис. 7

Микрососудистая сеть париетальной плевры человеческого плода (наливка раствором туши). Об.8х, ок. 10х.



Рис. 8

Микрососудистая сеть париетальной плевры человеческого плода (наливка раствором туши). Об.8х, ок. 10х.



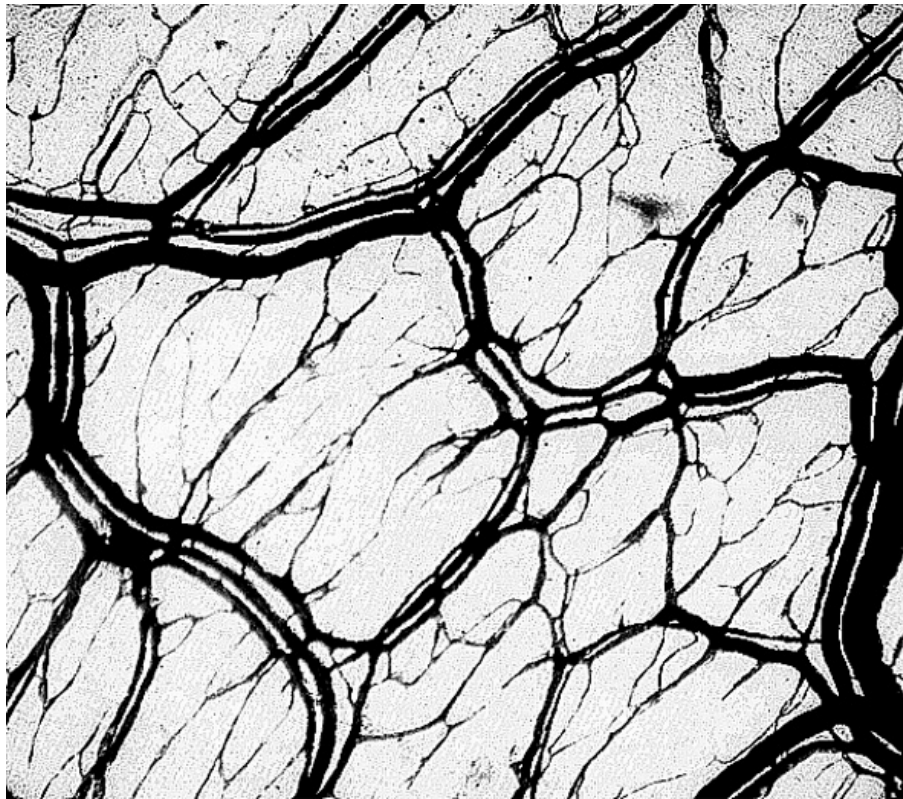


Рис. 9

Микрососудистая сеть париетальной плевры человеческого плода (наливка раствором туши). Об.8х, ок. 10х.

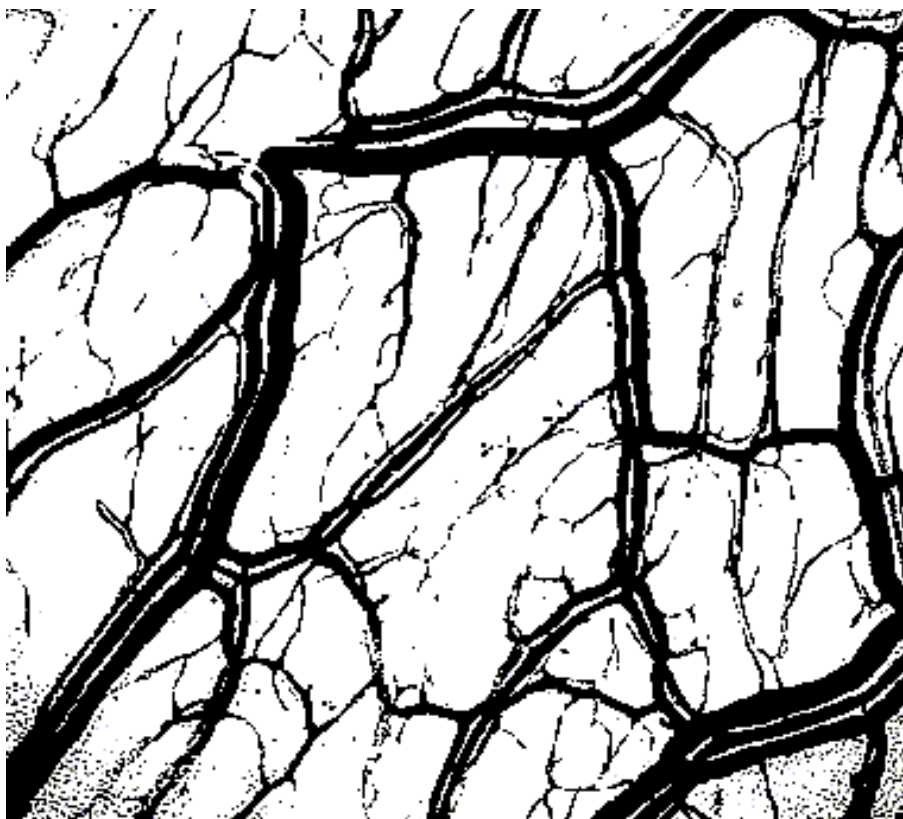
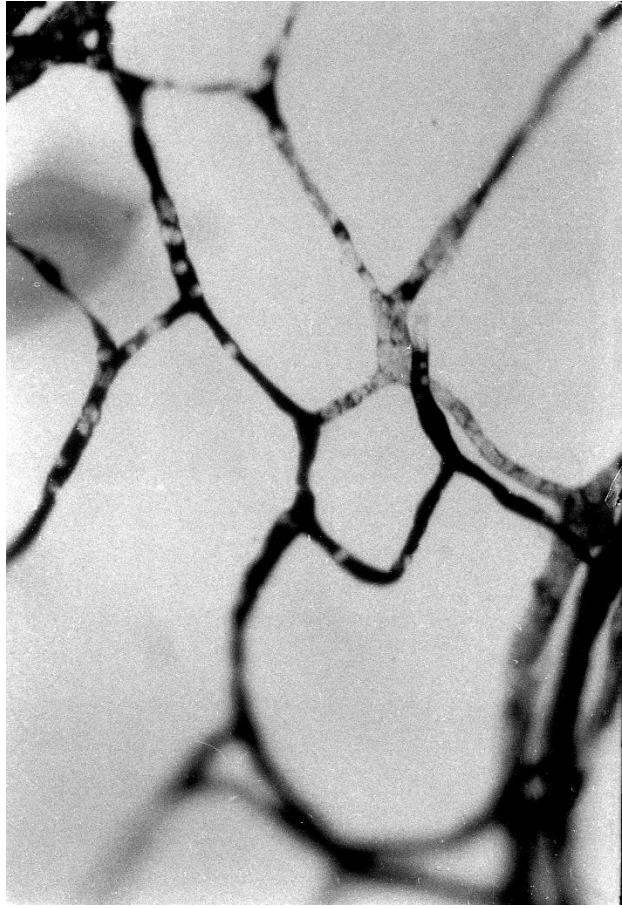


Рис. 10

Микрососудистая сеть париетальной плевры человеческого плода (наливка раствором туши). Об.8х, ок. 10х.





## *Пьеса*

*Говорят, если деревья долго лежат в земле,  
То они превращаются в уголь, в каменный уголь,  
Они долго горят не сгорая, и это даёт тепло.  
А я хочу тянуться в небо.  
Не потому, что я лучше других деревьев, нет.  
А просто, я другое дерево.  
Я такое дерево*

*Григорий Поженян «Я такое дерево»*

Для формализации описания конструкции, конфигурации, геометрии, топологии КСС, модифицируем классические морфологические (анатомические) термины, применяемые при их вербальном описании. Вместо терминов «артерия», «мелкая артерия», «артериола», «прекапилляр», «капилляр», «посткапилляр», «венула», «мелкая вена», «вена», а также «шунт» и «полушунт» [Куприянов В. В., Караганов Я. Л., Козлов В. И. Микроциркуляторное русло. – М.: Медицина, 1975], будем использовать универсальный термин «трекер». Вместо терминов «разветвление», «ответвление», «бифуркация», «трифуркация», «сосудистый тройник» будем использовать универсальный термин «узел» [Глотов В. А. Системный анализ морфофункциональных зависимостей в генезе микрососудистых бифуркаций (05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации; 14.00.02 – Анатомия человека). Диссертация в виде научного доклада на соискание учёной степени доктора медицинских наук – Тула, 2002. – 63 с.]

*Определение 1.* Трекер – это круглая цилиндрическая трубка без ответвлений, соединяющая в КСС два соседних узла. Трекер имеет количественные характеристики: диаметр внутреннего просвета ( $d$ ) и длину ( $l$ ) – расстояние между его концами. Кроме того, в общем случае трекер обладает пластичностью (приспособительной изменчивостью), которая характеризуется искривлением  $C = l/l_{\min}$ , где  $l$  – реальная длина трекера,  $l_{\min}$  – минимальная длина (длина прямолинейного трекера).  $C$  – безразмерная величина,  $C \geq 1$ .

***Трекер – 1-я структурно-функциональная единица КСС.***

*Определение 2.* Узел – это область стыка трекеров.

Узел имеет собственную геометрию, форму, границы и отличается от трекера. Узел имеет безразмерную характеристику – степень ветвления узла  $n$ .

***Узел – это 2-я структурно-функциональная единица КСС.***

*Определение 3.* Степень ветвление узла  $n$  равна числу трекеров, образующих узел.

Тщательные наблюдения КСС *in vivo* достоверно показывают, что в реальных КСС исключительно генерируются только узлы, имеющие степень ветвления  $n=3$ .

**Величина  $n=3$  – это 1-я универсальная безразмерная константа ангиогенеза в КСС.**

Примитивные КСС появляются в процессе васкулогенеза на самых ранних стадиях эмбриогенеза путем дифференцировки мезенхимальных клеток в ангиобласты и гемобласты и образования замкнутой сетевидной системы синусоидоподобных полостей (рис. 1) [Заварзин А. А. Курс гистологии и микроскопической анатомии. – Л.: Медгиз, 1938. – С. 350-351].

После подключения к примитивным КСС генератора волнового потока крови - примитивного сердца, начинается микроциркуляция примитивной крови. Сердце на всех этапах развития представляет из себя поршневой перистальтический насос, генерирующий **сложное волновое движение крови – «полидисперсной суспензии с несферической формой дисперсной фазы»**. Процесс генерации новых сосудов путём васкулогенеза останавливается. Ангиобласты дифференцируются в эндотелиоциты, новые сосуды (трекеры) начинают генерироваться путём ангиогенеза по принципу Рабля: «Эндотелий – от эндотелия!» [Голубев А. Е. Материалы для анатомии, физиологии и истории развития волосных сосудов. – Диссертация для получения степени доктора медицины. – С.-Пб.: В типографии Якова Грея, 1868. – С. 20-52; Щелкунов С. И. Прогрессивное и регрессивное развитие капилляров. – Архив анатомии, гистологии и эмбриологии. – 1937. – Т. XVII. – №1. – С. 6-20; Клосовский Б. Н. Развитие капилляров мозга. – М.: Медгиз, 1949] (рис. 4).

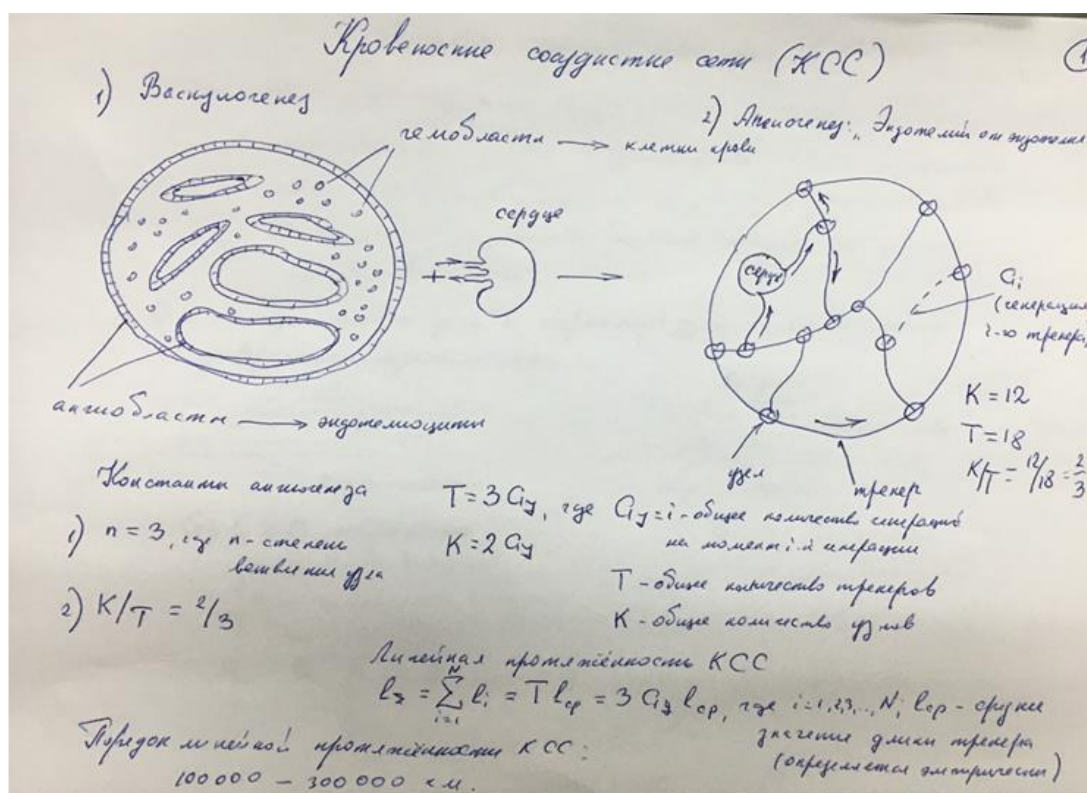
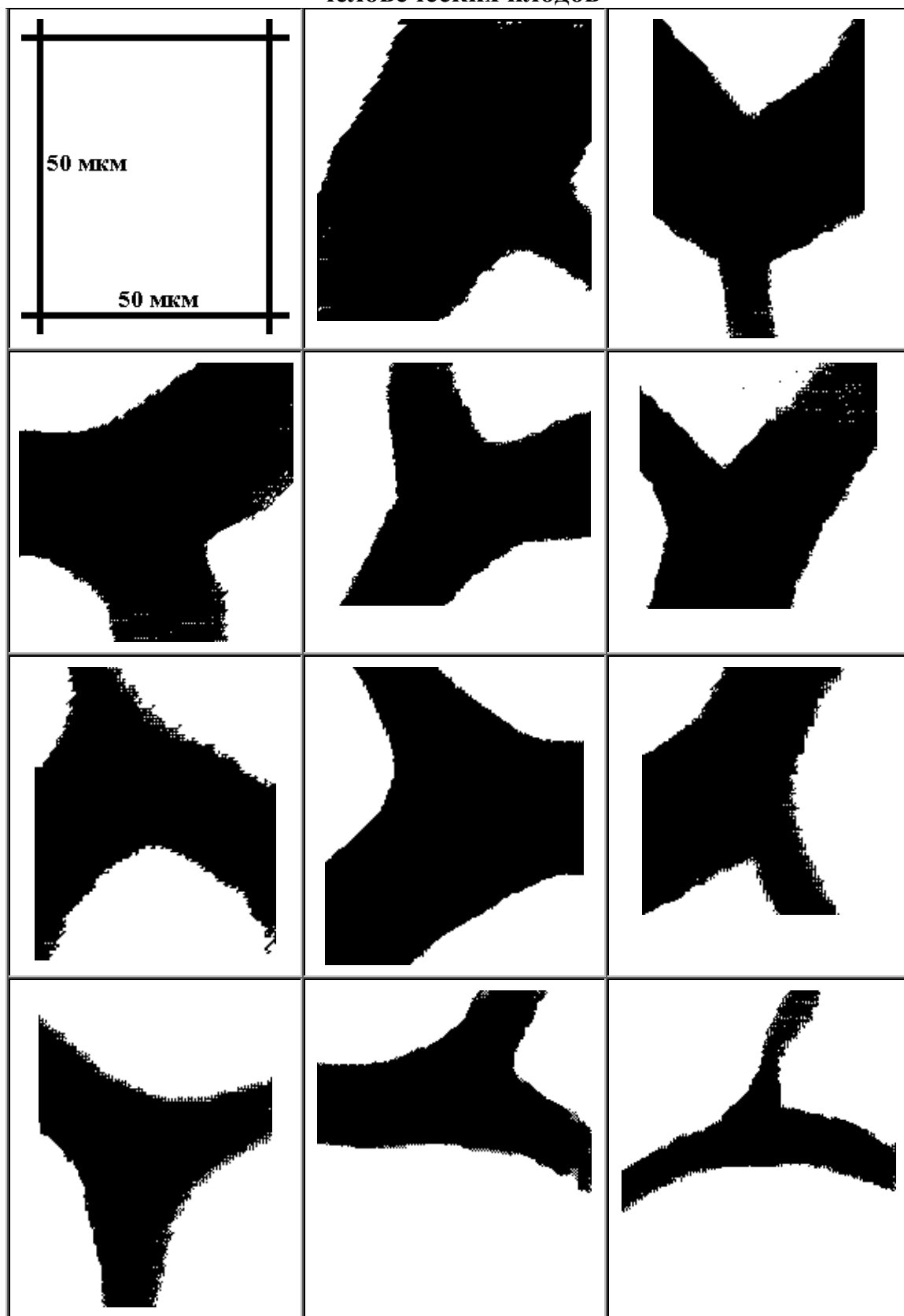
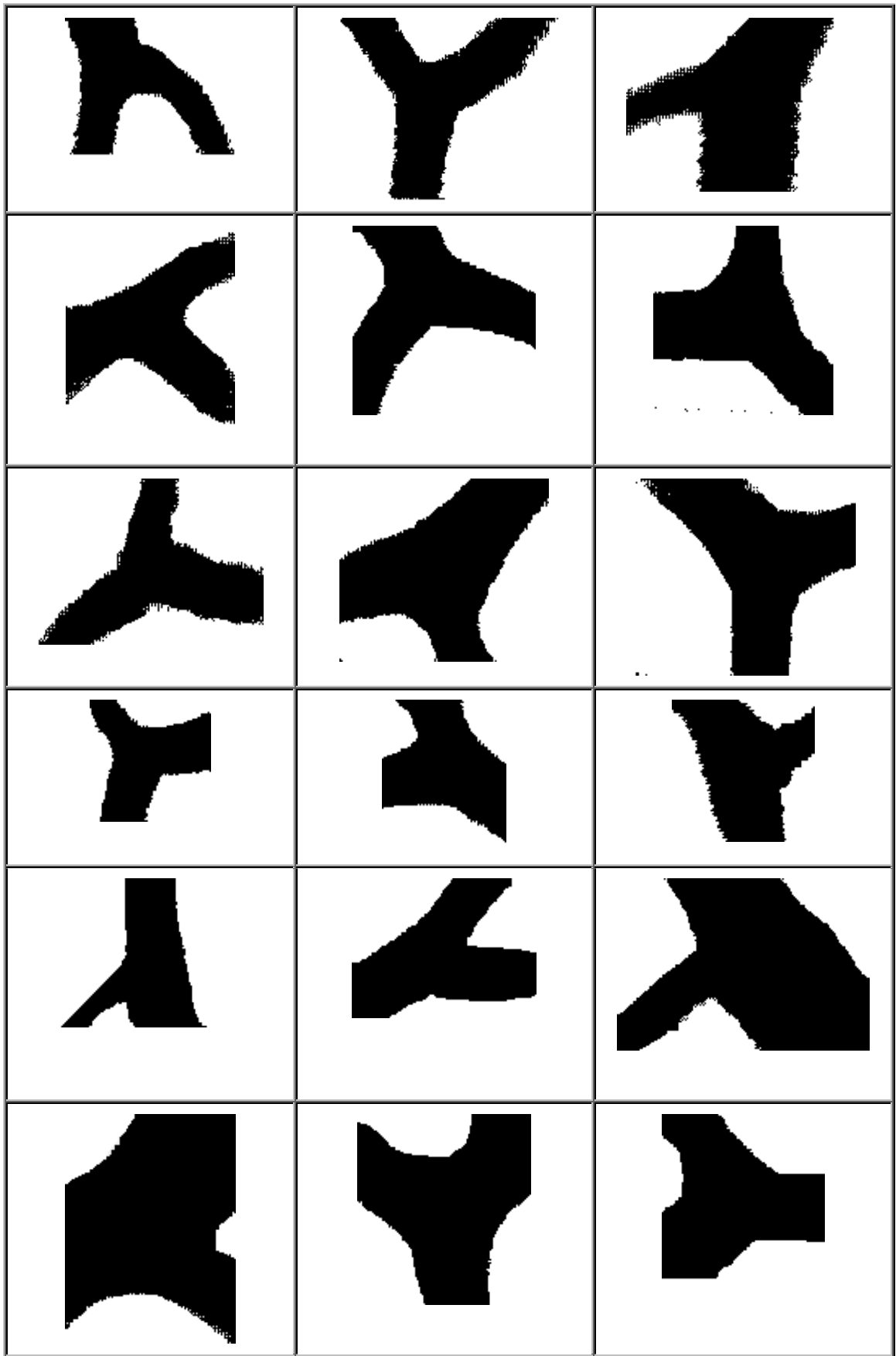


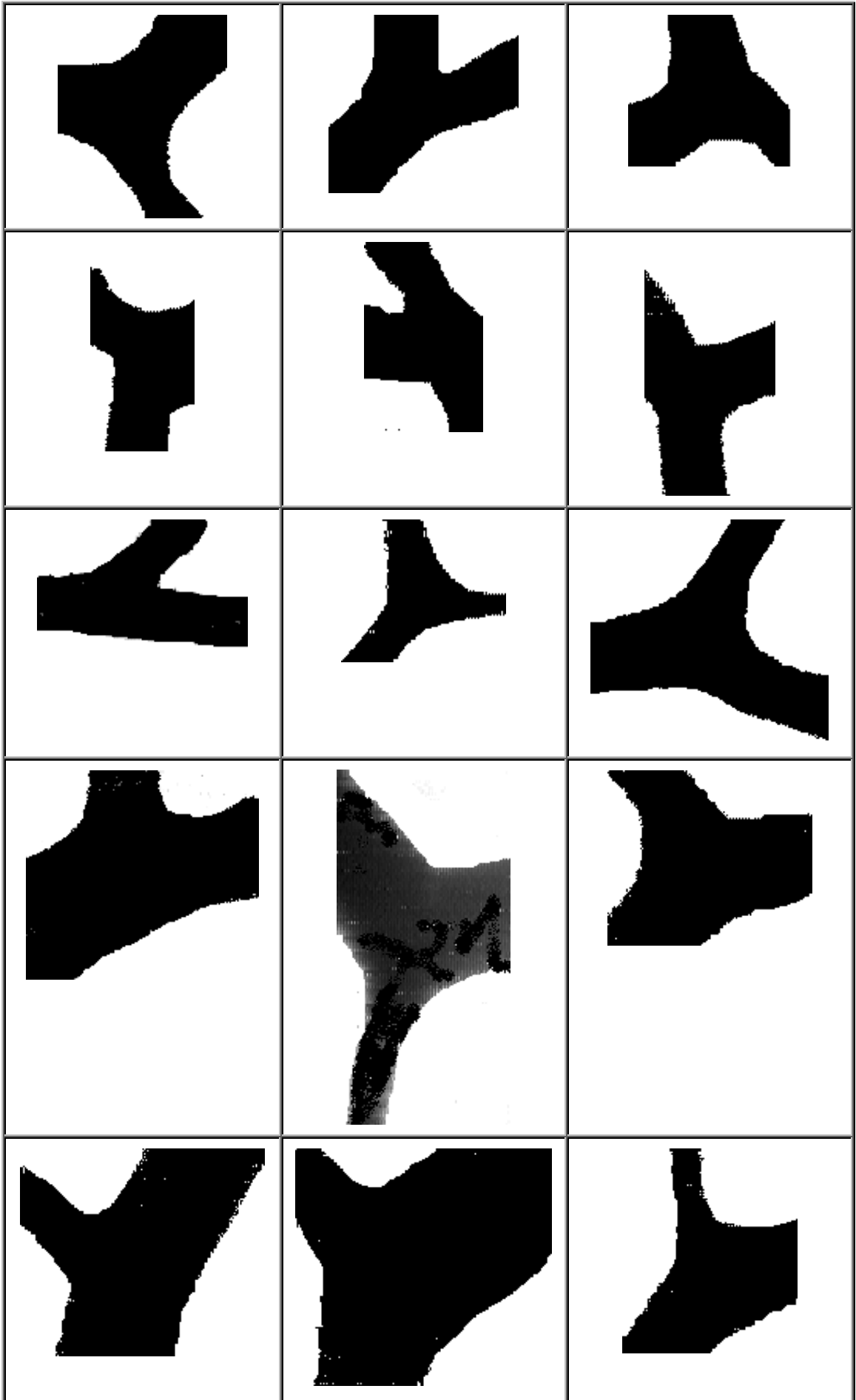
Рис. 4. Генерация КСС (схема).

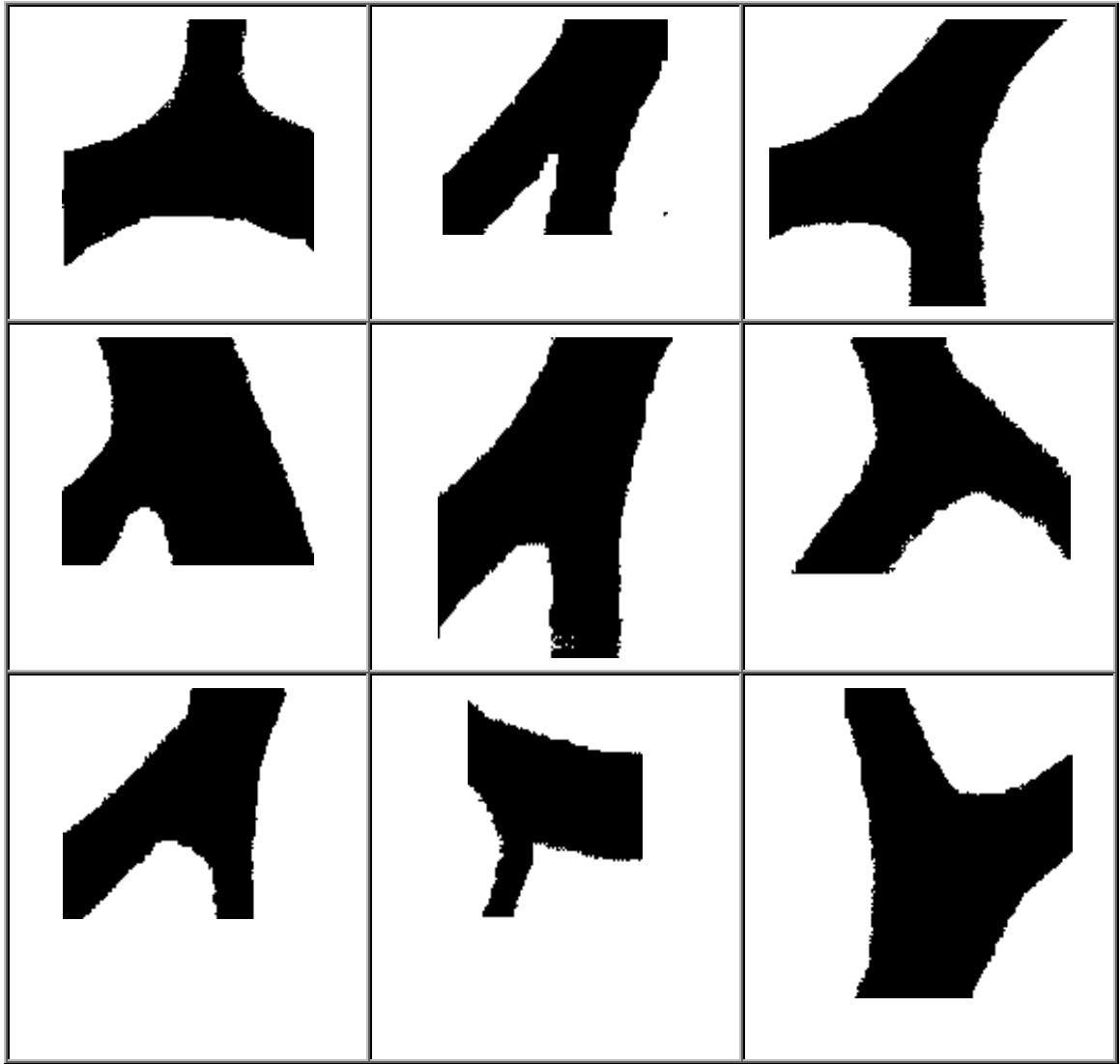
Таблица 6

**Конфигурации микрососудистых бифуркаций (микрососудистых узлов) в микрососудистых сетях париетальной плевры человеческих плодов**









При этом в результате каждой генерации нового сосуда  $G_i$ , где  $i=1, 2, 3, \dots, N$  (здесь  $i$  – номер генерации); общее количество узлов КСС увеличивается на 2, а общее количество трекеров на 3. Легко вывести формулы для подсчёта общего количества  $K_i$  узлов и общего количества  $T_i$  трекеров в КСС на момент  $i$ -ой генерации:

$$\begin{aligned} K_i &= 2G_i; \\ T_i &= 3G_i, \end{aligned}$$

где  $G_i = i$  – общее количество генераций на момент  $i$ -ой генерации.

Здесь необходимо отметить, что в процессе генерации, развития и перестройки КСС в онтогенезе одновременно имеет место и обратный процесс – дегенерация, разрушение КСС: исчезновение узлов и трекеров в результате управляемого апоптоза эндотелиальных клеток [Ярыгин Н. Е., Кораблёв А. В. Значение программированной гибели эндотелия в построении внутриорганный кровеносного русла в эмбриогенезе человека. – Архив

патологии. – 1995. – Т. 57. – Вып. 6. – С. 39-44; Лушников Е. Ф., Абросимов А. Ю. Гибель клетки (апоптоз). – М.: Медицина, 2001. – 192 с.: ил.]

В процессе дегенерации КСС при каждом акте дегенерации  $D_q$ , где  $q=1, 2, 3, \dots, N$  (здесь  $q$  – номер дегенерации); общее количество узлов КСС уменьшается на 2, а общее количество трекеров на 3. Легко вывести формулы для подсчёта общего количества  $K_q$  узлов и общего количества  $T_q$  трекеров в КСС исчезнувших на момент  $q$ -ой дегенерации:

$$\begin{aligned} K_q &= 2G_q; \\ T_q &= 3G_q, \end{aligned}$$

где  $G_q = q$  – общее количество дегенераций на момент  $q$ -ой дегенерации.

В процессе генерации КСС отношение  $K_i/T_i$  есть постоянная дробная величина -  $2/3$ .

**Величина  $K_i/T_i = 2/3$  – это 2-я универсальная безразмерная константа ангиогенеза в КСС.**

В процессе дегенерации КСС отношение  $K_q/T_q$  есть постоянная дробная величина -  $2/3$ .

**Величина  $K_q/T_q = 2/3$  – это 3-я универсальная безразмерная константа ангиогенеза в КСС.**

В различные периоды онтогенеза одновременно происходят процессы генерации новых узлов и трекеров и процессы дегенерации уже существующих. Количественно соотношение между этими параллельными процессами, после достижения некоего максимального развития КСС при некотором  $i_{\max}=I$  и наступившего состояния равновесия, можно выразить системой уравнений равновесия

$$\begin{aligned} G_I &= G_i, \text{ при } i_{\max}=I; \\ K_I &= \text{const}; \\ T_I &= \text{const}; \\ i &= 1, 2, 3, \dots, N; \\ q &= 1, 2, 3, \dots, N; \\ i &= q; \\ K_I + K_i &\leftrightarrow K_I + K_q; \\ T_I + T_i &\leftrightarrow T_I + T_q; \\ K_i - K_q &= 0; \\ T_i - T_q &= 0; \end{aligned}$$

где  $K_I$  и  $T_I$  – максимальное количество узлов и трекеров в КСС, достигнутое на момент генерации  $i_{\max}=I$  на  $G_I$  - генерации.

При  $i > q$ ,  $K_i > K_q$ ,  $T_i > T_q$  – равновесие смещается в сторону прогрессивного развитие КСС:

$$\begin{aligned} K_i - K_q &> 0; \\ T_i - T_q &> 0. \end{aligned}$$

При  $i < q$ ,  $K_i < K_q$ ,  $T_i < T_q$  – равновесие смещается в сторону деградация КСС:

$$\begin{aligned} K_i - K_q &< 0; \\ T_i - T_q &< 0. \end{aligned}$$

Элементарность и примитивность вышеприведенных рассуждений только кажущаяся. На самом деле, если развернуть эти рассуждения с включением *теоретико-множественных, комбинаторных, вероятностных и топологических аспектов*, то откроется *бездна*, «которая начнёт вглядываться в нас».

Как-то великого композитора и выдающегося химика А. П. Бородина (1833-1887) спросили, как у него получается всё так просто и в музыке и химии, на что он ответил, перефразировав слова великого художника Павла Федотова (1815-1852): «Будет просто, если сделаешь раз со сто!».

Ветвящиеся системы циркуляции биологических жидкостей, тканей и сред: крови, лимфы, межклеточных пространств, желчи, секретов сложных экзокринных желез, семенной жидкости, ликвора, мочи; воздуха, а также проведения электрических импульсов, скелета лежат в основе конструкции органов и систем высших многоклеточных организмов. Ветвящиеся биологические структуры - фундаментальный морфологический феномен (табл. 1).

В нервной системе реализуются узлы двух типов: 1) узлы со степенью ветвления  $n=3$  (разветвления аксонов и дендритов, аксо-дендритические контакты); 2) узлы со степенью ветвления  $n>3$  (тела нервных клеток представляют собой узлы, степень ветвления которых равна числу нервных окончаний отростков других нервных клеток на её поверхности).

Есть ещё огромная область нерассмотренных ветвлений в мире растений, грибов, кораллов и др.

Таблица 1

Элементарная топология биологических ветвящихся систем

Топология ветвления	Древовидный тип - <sup>д</sup>	Сетевой тип - <sup>с</sup>	Древовидно-сетевой тип – <sup>д+с</sup>
Параметры ветвления			
Число генераций, $i=1, 2, 3, \dots, {}^cN$ ; $j=1, 2, 3, \dots, {}^dN$	<sup>д</sup> G <sub>j</sub>	<sup>с</sup> G <sub>i</sub>	<sup>д</sup> G <sub>j</sub> + <sup>с</sup> G <sub>i</sub>
Степень ветвления узла n	3	3	3
Число узлов	<sup>д</sup> K <sub>j</sub>	2 <sup>с</sup> K <sub>i</sub>	<sup>д</sup> K <sub>j</sub> + 2 <sup>с</sup> K <sub>i</sub>
Число трекеров	2 <sup>д</sup> T <sub>j</sub>	3 <sup>с</sup> T <sub>i</sub>	2 <sup>д</sup> T <sub>j</sub> + 3 <sup>с</sup> T <sub>i</sub>
K <sub>i</sub> /T <sub>i</sub>	1/2	2/3	( <sup>д</sup> K <sub>j</sub> + 2 <sup>с</sup> K <sub>i</sub> )/(2 <sup>д</sup> T <sub>j</sub> + 3 <sup>с</sup> T <sub>i</sub> )



Примеры	Бронхиальное дерево, сложные железы, мочевыдели- тельные канальцы, деревья, корневая система деревьев и т.д.	Кровеносные сосудистые сети	Лимфовыводящие пути, семявыносящие протоки, желчевыводящие пути, ликворывыводящие пути
---------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------

Линейная протяжённость  $l_{\Sigma}$  реальных КСС определяется по формуле:

$$l_{\Sigma} = T_i l_{cp} = 3G_i l_{cp},$$

где  $l_{cp}$  – среднее значение длины трекера, определяемое эмпирически. Эта формула имеет важное прикладное значение, так как позволяет достаточно просто с заданной погрешностью определить линейную протяжённость КСС в отдельном органе, области или во всём организме животного и человека в целом.

Здесь уместно высказать частное мнение автора, что его коллеги-морфологи, занимаясь изучением микроциркуляторного русла (МЦР) должны честно признаться, что они очень часто занимались ерундой, изучая частные второстепенные вопросы и не занимались главными.

***Один из таких главных вопросов – установление линейной протяжённости КСС у животных и человека in vivo как в отдельно взятых органах, так и во всём теле в целом.***

«Крог считает, что на 1 мм<sup>2</sup> человеческих мышц имеется 2000 капилляров. По его мнению, общее протяжение всех капилляров в мускулатуре человека (при весе мускулатуры 50 кг) составляет 100 000 км, а общая поверхность их равна 6300 м<sup>2</sup>. К сожалению, в своей работе Крог не приводит ряда данных, с помощью которых можно было бы легко проверить его расчёты. Нестеров [Нестеров А. И. К учению о кровеносных капиллярах и капилляроскопии, как методе их изучения в нормальных и патологических условиях. – Известия Томского государственного университета: Томск, 1929. – Т. 84. – С. 73-75] подсчитал, что в 1 мм<sup>2</sup> человеческой кожи содержится 55 собственно капиллярных петель и что длина капилляров человеческой кожи равна  $3 \cdot 10^{10} \mu = 30,8$  км...

Если остановиться на указанном выше числе капилляров (2 миллиардов капилляров большого круга) и принять длину среднего капилляра в 400μ, то общая протяжённость капилляров большого круга выразится 8000 км. Как видим, эта величина значительно уклоняется от данных Крога. Следует, впрочем, заметить, что в области «количественной анатомии капилляров» до сих пор существует большая путаница» [Чижевский А. Л. (1959), - С. 442-443].

К сожалению, эти оценочные данные линейной протяжённости КСС с тех пор переходят из статьи в статью, из монографии в монографию, из учебника в учебник. Фундаментальных системных исследований линейной протяжённости КСС, к сожалению, до сих пор не проводилось.

В таблице 2 приведены фрагменты результатов элементарного математического моделирования линейной протяжённости КСС.

Таблица 2

Математическое моделирование линейной протяжённости КСС

$G_i$	$T_i=3G_i$	$N_i=2G_i$	$l_{cp}$ (средняя длина трекера КСС) в	$l_{\Sigma}=T_i l_{cp}=3G_i l_{cp}$ (линейная протяжённость КСС)
$10^9$	$3 \cdot 10^9$	$2 \cdot 10^9$	50 мкм	150 км
			100 мкм	300 км
			200 мкм	600 км
			400 мкм	1200 км
			800 мкм	2400 км
$10^{10}$	$3 \cdot 10^{10}$	$2 \cdot 10^{10}$	50 мкм	1500 км
			100 мкм	3000 км
			200 мкм	6000 км
			400 мкм	12000 км
			800 мкм	24000 км
$10^{11}$	$3 \cdot 10^{11}$	$2 \cdot 10^{11}$	50 мкм	15000 км
			100 мкм	30000 км
			200 мкм	60000 км
			400 мкм	120000 км

			800 мкм	240000 км
--	--	--	---------	-----------

Величины  $K$ ,  $T$  и соответственно протяжённость  $l_2$  реальных КСС в организме животных и человека имеют «астрономические» значения, сопоставимые с количеством звёзд в галактиках и соответственно с расстоянием между Землёй и Луной. Анализ таких сложных «астрономических» систем с различными проявлениями «бесконечности» требуют особых подходов, в какой-то мере сопоставимыми с подходами, принятыми в статистической механике.

Пока мы лишь можем вести более или менее правдоподобные рассуждения о технологиях, лежащих в основе формирования КСС и принципах их функционирования в организмах животных и человека.

Физические и технологические принципы организации и функционирования живых систем в органическом мире, их совершенство и сложность, просто не сопоставимы ни с какими самыми сложными искусственными технологиями и системами до сих пор созданными и применяемыми человеком. И может получиться так, что человечество просто не успеет даже приблизиться к пониманию этой совершенной сложности. Просто некому это будет делать.

Формирование и функционирование КСС происходит автоматически, синхронно, взаимосвязано, распределённо в биологическом пространстве на молекулярном уровне (работа генома и наномолекулярных машин), на ультраструктурном внутриклеточном и межклеточном уровне (работа органелл, цитоплазмы, мембран и межклеточного вещества), на микроскопическом уровне (клеточная и тканевая биология - гистология), макро-микроскопическом уровне (структурно-функциональные единицы органов и систем – «биологическая тканевая кристаллизация») и на макроскопическом системном организменном уровне.

#### Главная тема

### **Феномен сверхтекучести крови (в предельном смысле), условия его возникновения, абсолютная необходимость существования (микроциркуляторный аспект)**

В неорганическом мире известно удивительное свойство жидкого гелия (изотоп  $^4\text{He}$ ), получившее название «сверхтекучести». При температуре 2,19 К в нижней точке ( $\lambda$ -точка) фазового перехода второго рода, точке пересечения линии на фазовой диаграмме гелия с линией равновесия жидкости с паром, гелий протекает по узким капиллярам или щелям, не обнаруживая никакой вязкости.

*Кровь представляет из себя жидкую ткань полидисперсных суспензий с несферической формой дисперсной фазы, движение которой в КСС нельзя отождествлять в полном физическом смысле с движением*

*жидкостей, которые рассматриваются в классической гидродинамике.* Это особое состояние органической субстанции в органическом мире. Ещё раз повторим уже приведенную выше цитату:

«Кровь пришла к современному состоянию путём длительной биологической эволюции, совершенствуясь одновременно с развитием органического мира. ...в процессе эволюции ... неупорядоченные состояния крови должны были уступить место более совершенным состояниям. Кровь человека должна обладать стройной физической и геометрической организацией, ибо в органическом мире устойчивые состояния являются в то же время и более вероятными. В кровеносном русле должны непрерывно действовать антихаотические факторы, дабы предохранить его от постоянной тенденции к переходу в термодинамическое равновесное состояние, от выравнивания химических и электрических потенциалов, т. е. кровеносное русло должно быть в высокой мере упорядоченно геометрически, физически и химически» [Чижевский А. Л., 1959. – С. 13].

Астрономический масштаб КСС а priori указывает *на существование каких-то особых принципов их функционирования. Одним из таких фундаментальных принципов может быть феномен сверхтекучести крови (в предельном смысле):* способность крови двигаться по трекерам и узлам в неизменном виде, перенося массу крови из одного конца трекера в другой, без потери энергии и без массопереноса через сосудистую стенку, не участвуя в обмене веществ.

Рассмотрим *условия, при которых может возникать в КСС феномен сверхтекучести крови.*

Предположим, что эндотелиоциты, выстилающие внутренний просвет узлов и трекеров, обладают способностью управлять смачиваемостью своей клеточной поверхности, соприкасающейся с потоком крови, благодаря работе молекулярных наномашин, расположенных в цитоплазме и прилежащей к потоку крови мембране, обуславливающих их механочувствительность.

Смачиваемость клеточной мембраны количественно характеризуется косинусом краевого угла  $\theta$  ( $\cos\theta > 0$  для смачивающих жидкостей и  $\cos\theta < 0$  для несмачивающих).

При полном смачивании ( $\cos\theta = 1$ ) жидкость растекается по всей поверхности клеточной мембраны эндотелиоцита.

*При полном несмачивании ( $\cos\theta = -1$ ) движущийся поток крови внутри трекера под действием сил поверхностного натяжения крови, приводящих к минимизации внешней поверхности потока, «свёртывается» и принимает форму, имеющую круглую цилиндрическую поверхность.*

Силы поверхностного натяжения потока крови, обусловленные силами Ван-дер-Ваальса (силами межмолекулярного притяжения) будут направлены перпендикулярно к оси симметрии круглого цилиндрического потока крови и создадут лапласовское давление

$$p_{\pi} = 4\sigma/d,$$

где  $p_l$  – лапласовское давление,  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения крови,  $d$  – диаметр внутреннего просвета трекера.

### Вариация

Иоганнес Дидерик Ван-дер-Ваальс (1837-1923) – лауреат Нобелевской премии по физике 1910 г. «за работу над уравнением состояния газов и жидкостей». «Межмолекулярное притяжение, обусловливаемое силами Ван-дер-Ваальса, представляет собой одно из всеобщих явлений природы. Оно свойственно всем веществам и проявляется в газо- и парообразных, жидком и твердом состояниях. Силы Ван-дер-Ваальса действуют как между однородными молекулами данного вещества, так и между разнообразными молекулами различных веществ» [<https://yandex.ru/search/?text=природа+сил+ван-дер-ваальса+заключается+в+следующем&clid=2261451&banerid=0899040033%3ASW-75b4ba139331&win=240&lr=12>].

«В 1930 г. выдающимся немецким теоретиком Фрицом Лондоном было дано правильное истолкование природы ван-дер-ваальсовых сил, сразу позволившее понять, почему они универсальны. Лондон обратил внимание на то обстоятельство, что даже в случае полной сферической симметрии электронной оболочки атома его дипольный момент равен нулю только в среднем. Но в каждый данный момент времени электрон всегда «немного больше по одну сторону ядра, нежели по другую», и, следовательно, мгновенное значение дипольного момента – ненулевое. Когда два атома находятся достаточно близко один от другого, между их мгновенными дипольными моментами возникает электростатическое взаимопритяжение (электроны двух атомов как бы начинают вращаться синфазно), сила которого, как было предугадано Леннардом-Джонсом, обратно пропорциональна седьмой степени расстояния.

Очень важно также то, что согласно теории Лондона, силы межмолекулярного притяжения в противоположность обычным химическим связям аддитивны. Теория Лондона ознаменовала огромный интерес в углублении представлений о строении материи, но, как показало последующее развитие, её главное достижение состояло в том, что она дала физикам качественную картину ван-дер-ваальсовых сил. Что же касается их точного закона, то ясность в этом вопросе отсутствует и по сей день.

...В конце 40-х годов в исследованиях сил Ван-дер-Ваальса возникло ещё одно необычайно интересное направление. Речь идёт об открытии ван-дер-ваальсовского притяжения между макроскопическими телами, отстоящими друг от друга на макроскопические расстояния, – это притяжение уже измерено к настоящему времени на расстояниях свыше 1 мкм! Лондоновский механизм в этом случае модифицируется, поскольку взаимодействие между атомами становится запаздывающим: распространение электрического поля от одного атома к другому занимает время, сравнимое с периодом обращения электронов по орбитам. Синфазность этих вращений, таким образом, несколько нарушается, и для сил ван-дер-ваальсовского притяжения: вместо закона  $1/r^7$  возникает закон  $1/r^8$ . Теорию запаздывающих сил Ван-дер-Ваальса впервые предложил в 1948 г. голландский физик Х. Казимир, а в 1954 г. исчерпывающий классический анализ явления был дан известным советским теоретиком Е. М. Лифшицем [Дзялошинский И. Е., Лифшиц Е. М., Питаевский Л. П. Общая теория ван-дер-ваальсовых сил. – УФН, 1961, т. 73, с. 381-422]» [Кипнис А. Я., Явелов Б. Е. Иоганнес Дидерик Ван-дер-Ваальс (1837-1923). Отв. ред. д-р хим. наук Ю. И. Соловьёв. – Л.: «Наука» Ленинградское отд., 1985. – С. 227-228].

Движению крови по трекеру описывается уравнением Бернулли:

$$p_{ст} + \rho g \Delta h + \rho v^2 / 2 = const,$$

где  $p_{ст}$  – статическое давление крови в трекере,  $\rho$  – плотность крови в трекере,  $g$  – ускорение свободного падения,  $\Delta h$  – перепад высот на концах трекера,  $v$  – скорость движения потока крови в трекере,  $p_r = \rho g \Delta h$  – гидростатическое давление,  $p_{дин} = \rho v^2 / 2$  – динамическое давление.

### Вариация

Даниил Бернулли, будучи медиком, *профессором физиологии* Петербургской Академии наук (1725-1733 гг.), позднее занимая *кафедру анатомии* и ботаники, наконец, физики в Базеле (Швейцария) с 1733 г., создал своё основное знаменитое произведение «Гидродинамика, или записки о силах и движениях жидкостей», которое было издано в 1738 г. Идеи нового метода рассмотрения проблем гидродинамики возникли у Бернулли в Санкт-Петербурге, в том числе и *благодаря наблюдениям за движением крови*. Гидродинамика Бернулли основывается на применении представлений о «бесконечно малых частицах жидкости» и методов математического анализа. Его метод базируется на энергетических соображениях. Он применяет принцип «живых сил», сходный с понятием «потенциальная энергия», а также принцип неразрывности струи. Его научный вклад в развитие современной гидродинамики и гемодинамики исключительно высок [Голин Г. М., Филонович С. Р. Классики физической науки (с древнейших времён до начала XX в.): Справ. пособие. – М.: Высш. шк., 1989. – С. 170-180].

Полное давление крови в трекере будет складываться из суммы статического давления, гидростатического давления и динамического давления. Т.к. перепад высот концов трекера  $\Delta h$  очень маленькая величина при любой ориентации трекера в 3D-пространстве ( $\Delta h \rightarrow 0$ ). Гидростатическое давление  $p_r = \rho g \Delta h$  в трекере тоже очень маленькая величина и практически стремится к нулю. Иными словами, все трекеры, по крайней мере, в системе микроциркуляции, можно рассматривать лежащими горизонтально без уклона.

*Гравитация практически не участвует в движении крови в системе микроциркуляции, что доказывает длительное нахождение космонавтов в невесомости без каких-либо серьёзных нарушений со стороны микроциркуляции крови (Мудрый Отец, создавая Человека, предусмотрел для него возможность длительного выхода за пределы действия земной гравитации, чтобы иметь возможность покинуть свою колыбель Землю – это одно из проявлений антропного принципа в приложении к человеку).*

Полное давление крови в трекере в этом случае будет складываться из суммы статического давления и динамического давления ( $p_{дин} = \rho v^2 / 2$ ). Уравнение Бернулли примет вид

$$p_{ст} + \rho v^2 / 2 = \text{const.}$$

Давление на внутреннюю поверхность трекера будет равно статическому давлению  $p_{ст}$ . Лапласовское давление (вектор силы поверхностного натяжения, приложен к некоторой точке поверхности потока крови в трекере) и статическое давление крови (вектор силы статического давления крови,

приложен к некоторой точки внутренней поверхности трекера) направлены на встречу друг другу. Если эти точки совпадают и лежат на одной прямой, то эти силы взаимно компенсируют друг друга.

*При условии, когда  $p_l = p_{ст}$ , наступает состояние, когда давление на внутреннюю поверхность трекера, т. е. на поверхность эндотелиоцита равно 0. При этом полное давление крови, направленное вдоль оси трекера, никуда не девается, цилиндрический поток крови двигается как будто он находится в свободном ничем не ограниченном пространстве. Взаимодействия со стенкой нет, массопереноса через стенку нет, сопротивления со стороны стенки движению крови нет, потери энергии и импульса крови при прохождении трекера нет, обмена веществ через сосудистую стенку нет. Но зато есть перенос массы крови из одного конца трекера в другой, от узла к узлу. Это состояние и есть феномен сверхтекучести крови (в предельном смысле).*

Можно предположить, что *кровь при этом переходит в некое состояние, когда все частицы крови как бы сцеплены вместе и ни одну нельзя отделить, не разрушив всё состояние.*

Таким образом, *условием возникновения феномена сверхтекучести крови при прохождении трекера является следующее выражение:*

$$4\sigma/d = p_{ст}$$

Иными словами, *феномен сверхтекучести крови в трекере возникает тогда, и только тогда, когда лапласовское давление становится равным статическому давлению крови.*

Отсюда становится понятен механизм, при помощи которого может эффективно регулироваться транскапиллярный обмен веществ в КСС.

Когда смачиваемость поверхности эндотелиоцита «выключается», движущийся поток крови под действием сил Ван-дер-Ваальса крови «сворачивается», образуя круглую цилиндрическую поверхность, имеющую минимальную в данном случае поверхностную энергию.

При этом в потоке крови исчезает трение между осесимметричными концентрическими слоями крови и *уравнение (гипотеза) Ньютона*

$$F_{тр} = \eta \, dv/dx \, S,$$

где  $F_{тр}$  – сила внутреннего трения между слоями потока крови,  $\eta$  – коэффициент пропорциональности, или коэффициент внутреннего трения, или коэффициент динамической вязкости, или просто вязкость;  $dv/dx$  – градиент скорости (изменение скорости, отнесенное к длине направления, перпендикулярного направлению скорости);  $S$  – площадь взаимодействующих слоёв, *не выполняется (не соблюдается)*. В результате приостанавливает транскапиллярный обмен вещества и энергии между кровью и окружающими тканями.

## Маленькая вариация

Лауреат Нобелевской премии в области физики 2003 г. «за вклад в развитие теории сверхпроводимости и сверхтекучести» В. Л. Гинзбург предлагает следующее объяснение этого состояния (в сверхтекучем гелии): «Как же понять это движение без трения? Представьте, что все частицы жидкости как бы сцеплены вместе и ни одну нельзя отделить, не разрушив всё состояние» [Гинзбург В. Л., Андриюшин Е. А. Сверхпроводимость. – М.: Педагогика, 1990. – С. 65].

Как только энергетические ресурсы эндотелиоцита иссекают («аккумуляторы разряжены»), молекулярные наномашинки вновь самопроизвольно модифицируют его контактную с кровью поверхность таким образом (проявление механочувствительность эндотелия), что межмолекулярные силы притяжения Ван-дер-Ваальса между молекулами контактной поверхности эндотелиоцита и молекулами крови становятся максимально больше, чем у молекул крови между собой. Смачиваемость поверхности эндотелиоцита самопроизвольно «включается». Движущийся поток крови под действием этих сил «разворачивается». Поверхность эндотелиоцита начинает испытывать статическое давление крови. При этом в потоке крови возникает трение между осесимметричными концентрическими слоями крови, развивается ламинарное течение со всеми вытекающими физическими следствиями: *уравнение (гипотеза) Ньютона выполняется (соблюдается)*.

Кровь начинает взаимодействовать с поверхностью эндотелиоцита, обращённой в просвет трекера. Запускается транскапиллярный обмен веществ и энергии.

При этом форма поверхности потока крови в трекере будет определяться силами статического давления крови, законом Паскаля и физическими (механическими) изотропными-анизотропными свойствами пространства, окружающего просвет трекера. При изотропности этого пространства и избыточности стационарного давления крови форма поверхности потока крови будет оставаться осесимметричной круглой цилиндрической поверхностью.

Таким образом, при реализации описанной модели *in vivo феномен сверхтекучести крови является обязательным и необходимым условием функционирования КСС.*

При этом «астрономическая» линейная протяжённость КСС становится не критичной для работы генератора потока крови – сердца. Потери значительной части тела, например, в результате травмы (отрыв или ампутация одной или нескольких конечностей) или увеличение массы тела существенно или не влияют, или почти не влияют, на функционирование КСС.

Пьеса

Созерцание чуда



Феномен сверхтекучести крови воспринимается, на первый взгляд, как некое чудо, но, однако:

*«There are more things in heaven and earth, Horatio,  
Then are dreamt of in your philosophy»*

[«Есть многое на свете, друг Горацио, что и не снилось нашим мудрецам»

(В. Шекспир)].

Существование феномена сверхтекучести крови поддаётся экспериментальной проверке. Есть одна очень хорошо забытая работа, которая может быть прекрасной иллюстрацией феномена сверхтекучести крови в КСС [Яуре Г. Г. Об особой форме движения жидкости (крови) в здоровых кровеносных сосудах. – Доклады Академии Наук СССР. – 1947. – Т. LVI. - №9]:

*«Наблюдая в микроскоп движение крови в неизменённых сосудах, мы видим вдоль стенок сосудов узкий прозрачный слой, отделяющий основную массу потока крови от соприкосновения с интимой сосудов. Толщина этого слоя достигает до 0,1 радиуса сосуда.*

*В руководствах по физиологии этот слой именуется нуазейлевым пространством. Он как шубой охватывает столб несущихся кровяных телец и в нём мы не видим ни красных, ни белых клеток. Окутанный этой шубой, столб эритроцитов движется так, как будто кровяные тельца связаны между собою.*

*Никакого различия в скоростях движения эритроцитов в центре столба и на его краю, границе светлого слоя, не видно. Не видно и вращательных движений эритроцитов, которые неизбежно должны были бы возникать при сложном распределении скоростей, и что было бы тем более заметно на эритроцитах эллиптической формы холоднокровных животных.*

*Между тем, хотя эритроциты в движущемся столбе располагаются своими осями по разным направлениям – вдоль оси сосуда, вкось и даже поперечно – всё же вращения не наблюдается. Можно заметить только наклонение осей эритроцитов на крутых изгибах извитого хода капилляров.*

*Всё движение происходит с изумляющей глаз гладкостью. Вся масса столба движется одинаково с пульсаторными ускорениями, соответствующим каждой систоле сердца и диастолическими замедлениями. В венах эти замедления и ускорения слабо заметны.*

*Такое движение крови мы можем назвать столбовым движением жидкости, отличающимся от пластического течения тем, что на границе стенка сосуда – прозрачный плазматический слой движение совершается со скольжением...».*

Главная тема

## **Квантовая» (парциальная, дискретная) гемодинамика, аксиоматика и математический аппарат**

*Существует огромное количество морфологических проявлений сверхтекучести крови. Нужно только знать, куда смотреть!*

Для этого необходимо подкорректировать наши представления о характере движения крови в КСС. Это принципиально важно!

*Необходимо принять как постулат, что движение крови в КСС обладает дуализмом: с одной стороны это сплошной волновой поток полидисперсной суспензии с несферической формой дисперсной фазы, а с другой стороны – это поток порций крови (квантов крови) [«корпускул»], следующих один за другим без разрыва.*

После завершения сердечного цикла – сложного волнового многофазового процесса, генератор потока крови выбрасывает в трекер первый квант (порцию) крови. *Квант крови обладает волновыми свойствами и корпускулярными свойствами.*

В процессе продвижения квантов крови по трекерам КСС в узлах последних происходит их распад (в дальнейшем будем наряду с термином «распад» использовать эквивалентный термин «квантование»). Первый квант распадается на два новых кванта, те в свою очередь распадаются дальше. Так как КСС представляют из себя сетевой тип ветвления, то во многих узлах в результате квантования будет происходить слияние двух квантов в новый квант (рис. 5).

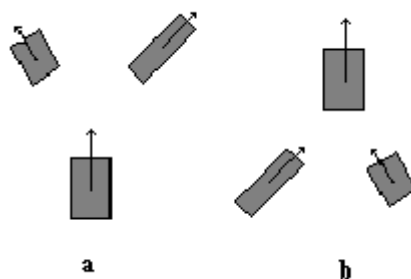


Рис. 5. Варианты движения кванта крови через микрососудистый узел

По мере продвижения потока крови к микрососудистому сегменту КСС, в процессе многократных квантований волновые свойства квантов крови будут вырождаться (постепенно пульсация крови будет уменьшаться), а корпускулярные свойства нарастать. Пульсации обычно уже не наблюдаются в трекерах, имеющих  $d < 100 \mu$ . В этих сосудах кванты (порции) крови двигаются друг за другом без разрывов. Пройдя микрососудистый сегмент КСС в трекерах, имеющих  $d > 100 \mu$ , волновые свойства квантов крови вновь начнут нарастать и в венах могут вновь появиться пульсации.

*Если бы квант крови «выскочил» из трекера в «свободное» пространство и стал бы «свободным» квантом, то он бы принял форму шара.*

Объём «свободного» кванта крови в  $i$ -м трекаре  $V_{\text{кв}(i)}$  будет определяться по формуле

$$V_{\text{кв}(i)} = 1/6 \pi d_i^3.$$

Двигаясь по трекару квант крови принимает форму круглого цилиндра, объём которого равен объёму «свободного» кванта крови

$$V_{\text{кв}(i)} = 1/6 \pi d_i^3 = 1/4 \pi d_i^2 \Delta l_i,$$

где  $\Delta l_i$  – длина кванта крови в  $i$ -м трекаре. Из этого выражения *получаем значение длины кванта крови  $\Delta l_i$  в  $i$ -м трекаре*

$$\Delta l_i = 2/3 d_i.$$

Из закона неразрывности струи следует что в процессе квантования *для конфигурации узла выполняется, так называемый, «закон кубов»*

$$d_1^3 = d_2^3 + d_3^3.$$

*Ключевым звеном этой математической модели является постулат, что при феномене сверхтекучести крови (в предельном смысле) распад (квантование) кванта (порции) крови при прохождении через узел описывается законом сохранения импульса в следующей («школьной») векторной форме*

$$m_1 \mathbf{v}_1 = m_2 \mathbf{v}_2 + m_3 \mathbf{v}_3.$$

$m_i$  – масса кванта крови в  $i$ -м трекаре узла ( $i=1, 2, 3$ );  $\mathbf{v}_i$  – вектор скорости кванта крови в  $i$ -м трекаре.

***Система постулатов предлагаемой формализованной функционально-анатомической математической модели КСС (предварительная попытка формулирования)***

1. КСС состоят только из двух структурно-функциональных элементов: трекаров и узлов.
2. КСС состоят только из узлов, имеющих степень ветвления узла  $n=3$ .
3. Отношение между общим количеством  $K_i$  узлов и общим количеством  $T_i$  трекаров в КСС на момент  $i$ -ой генерации есть постоянная величина  $K_i/T_i = 2/3$ .
4. «Свободный» квант крови вне  $i$ -го трекара, принимает форму шара, имеющего объём  $V_{\text{кв}(i)} = 1/6 \pi d_i^3$ , а внутри  $i$ -го трекара квант крови принимает форму круглого цилиндра, имеющего объём равный объёму «свободного» кванта, при этом длина кванта крови в трекаре  $\Delta l_i = 2/3 d_i$ .

5. Из закона неразрывности струи следует что в процессе квантования для конфигурации узла выполняется, так называемый, «закон кубов»

$$d_1^3 = d_2^3 + d_3^3.$$

6. Квант крови обладает двойственными свойствами: волновыми и корпускулярными (рис. 6).

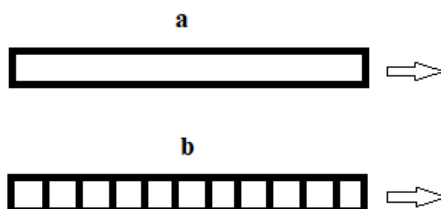


Рис. 6. Квантовая (парциальная) модель гемодинамики: а – стандартная модель гемодинамики, непрерывный волновой поток крови; б – непрерывный поток квантов (порций крови)

7. При феномене сверхтекучести крови (в предельном смысле) распад (квантование) кванта (порции) крови при прохождении через узел описывается законом сохранения импульса в векторной форме (рис. 7).

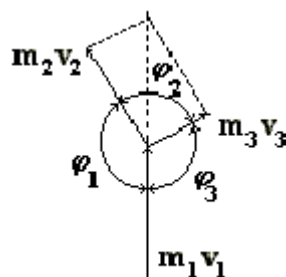


Рис. 7. Векторная диаграмма закона сохранения импульса, где  $m_i$  – масса кванта крови в  $i$ -м трекере,  $v_i$  – вектор скорости кванта крови в  $i$ -м трекере.

$$m_1 v_1 = m_2 v_2 + m_3 v_3.$$

При этом справедливы, в символах теории множеств, следующие геометрические соотношения для параметров  $m_i v_i$  и  $\varphi_i$  в векторной диаграмме закона сохранения импульсов

$$\{m_1 v_1; m_2 v_2; m_3 v_3\} \in P,$$

$$m_1 v_1 \cap m_2 v_2 \cap m_3 v_3 = (\cdot) \in P$$

где  $P$  – плоскость,  $(\cdot)$  – точка на плоскости  $P$ .

$$0 < \varphi_i < \pi,$$

$$\sum_{i=1}^3 \varphi_i = 2\pi$$

### Правил индексации параметров узлов и трекеров (рис. 8)

1. Если все три трекера в узле имеют разные диаметры, то параметру  $d_i$  большего трекера присваивают индекс  $i=1$ , параметрам  $d_i$  следующих по ходу часовой стрелки микрососудов присваивают соответственно индексы  $i=2$  и  $i=3$ .
2. Если все три трекера в узле имеют равные диаметры, то параметру  $d_i$  случайно выбранного трекера присваивают индекс  $i=1$ , параметрам  $d_i$  следующих по ходу часовой стрелки трекеров присваивают соответственно индексы  $i=2$  и  $i=3$ .
3. Если два из трех трекеров в узле имеют равные диаметры, то параметру  $d_i$  третьего трекера присваивают индекс  $i=1$ , параметрам  $d_i$  следующих по ходу часовой стрелки трекеров присваивают соответственно индексы  $i=2$  и  $i=3$ .
4. Параметру угла  $\varphi_i$  между осями трекеров с параметрами  $d_1$  и  $d_2$  присваивают индекс  $i=1$ , параметрам  $\varphi_i$  следующих по ходу часовой стрелки углов присваивают соответственно индексы  $i=2$  и  $i=3$ .

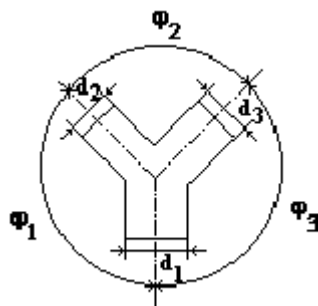


Рис. 8. Индексация параметров узлов и трекеров

Дискретный подход к структурному анализу КСС радикально упрощает задачу формализованного описания конфигурации КСС и позволяет построить (*быть может, впервые в истории математической биологии структур*) изящную аксиоматическую математическую модель (теорию) конфигурации КСС. Различные аспекты этой математической модели (теории) были развиты в работах автора этой статьи [7, 8, 9, 10 и др.].

### Наблюдаемые морфологические проявления *in vivo* сверткучести крови

- 1) Все узлы реальных КСС имеют степень ветвления  $n=3$ ;
- 2) Отношение  $K/T$  в реальных КСС есть постоянная величина -  $2/3$ ;

3) Оси симметрии трёх трекеров в области узла лежат в одной плоскости и пересекаются в одной точке;

$$\{L_{\infty(1)}; L_{\infty(2)}; L_{\infty(3)}\} \in P,$$

$$L_{\infty(1)} \cap L_{\infty(2)} \cap L_{\infty(3)} = (\cdot) \in P,$$

где  $L_{\infty(i)}$  – ось симметрии бесконечного порядка  $i$ -го трекера (кристаллографическая символика и терминология),  $P$  – плоскость,  $(\cdot)$  – точка на плоскости  $P$ .

$$0 < \varphi_i < \pi,$$

$$\sum_{i=1}^3 \varphi_i = 2\pi$$

4) Узел обладает плоскостью симметрии  $P$ , в которой лежат и пересекаются оси симметрии трекеров и всегда асимметричен в ней [Голубь А. С. Асимметричность артериальных микрососудистых разветвлений. – Физиологический журнал СССР им. И. М. Сеченова. – 1978. – Т. 64. – №10. – С. 1493–1497].

5) Для узлов, образованных трекерами, имеющими диаметры внутреннего просвета меньше 100 мкм, справедлива универсальная математическая модель узла

$$A_{3(j)}^2 d_3^4 - A_{1(j)}^2 d_1^4 - A_{2(j)}^2 d_2^4 - 2A_{1(j)} A_{2(j)} d_1^2 d_2^2 \cos \varphi_1 = 0;$$

$$A_{1(j)}^2 d_1^4 - A_{2(j)}^2 d_2^4 - A_{3(j)}^2 d_3^4 - 2A_{2(j)} A_{3(j)} d_2^2 d_3^2 \cos \varphi_2 = 0;$$

$$A_{2(j)}^2 d_2^4 - A_{1(j)}^2 d_1^4 - A_{3(j)}^2 d_3^4 - 2A_{1(j)} A_{3(j)} d_1^2 d_3^2 \cos \varphi_3 = 0;$$

где  $j=1,2$ ; при  $j=1$ ,  $A_{i(1)}=H_i$ ; при  $j=2$ ,  $A_{i(2)}=\eta_i$ , где  $H_i$  и  $\eta_i$  – соответственно полное давление крови и коэффициент динамической вязкости крови в  $i$ -м трекере,  $d_i$  – диаметр  $i$ -го трекера ( $d_i < 100$  мкм),  $\varphi_i$  – угол между осями симметрии просветов трекера, при этом  $0 < \varphi_i < \pi$ , и

$$\sum_{i=1}^3 \varphi_i = 2\pi, i = 1, 2, 3.$$

6) Из универсальной математической модели узла следуют количественные отношения между структурными параметрами его конфигурации и параметрами гемодинамического фактора. Так, задав направление потока крови через узел и параметр полного давления крови или коэффициент динамической вязкости крови  $A_{i(j)}=t$ , где  $t$  – имеет некоторое

значение, в одном из его микрососудов модель позволяет определить значения этих параметров в двух других микрососудах по формулам:

$$\begin{aligned} A_{1(j)} &= t; \\ A_{2(j)} &= \frac{d_1^2 \sin \varphi_3}{d_2^2 \sin \varphi_2} t; \\ A_{3(j)} &= \frac{d_1^2 \sin \varphi_1}{d_3^2 \sin \varphi_2} t. \end{aligned}$$

7)

$$\begin{aligned} v_1 \rho_1 d_1 \\ v_2 &= \frac{\rho_1 d_1^3 \sin \varphi_3}{\rho_2 d_2^3 \sin \varphi_2} v_1 \\ v_3 &= \frac{\rho_1 d_1^3 \sin \varphi_1}{\rho_3 d_3^3 \sin \varphi_2} v_1. \end{aligned}$$

8) При условиях  $A_{1(j)}=A_{2(j)}=A_{3(j)}$  и  $d_i > 100$  мкм, которые соответствуют модели поведения крови как ньютоновской жидкости универсальная модель оптимальной конфигурации микрососудистого узла переходит в модель Roux-Murray в модификации автора этого доклада, из которой следуют правила Ру. Модель Roux-Murray представляет собой частный случай универсальной модели оптимальной конфигурации микрососудистого узла [Мамисашвили В. А., Бабунашвили М. К., Мчедlishvili Г. И. Критерий оптимального функционирования подсистем крупных и мелких пиальных артерий. – Физиологический журнал СССР им. И. М. Сеченова. – 1975. – Т. 61. – № 10. – С. 1501–1506].

$$\begin{aligned} d_3^4 - d_1^4 - d_2^4 - 2d_1^2 d_2^2 \cos \varphi_1 &= 0; \\ d_1^4 - d_2^4 - d_3^4 - 2d_2^2 d_3^2 \cos \varphi_2 &= 0; \\ d_2^4 - d_1^4 - d_3^4 - 2d_1^2 d_3^2 \cos \varphi_3 &= 0. \end{aligned}$$

8) Среди бесконечного множества геометрически возможных конфигураций узлов феномен сверхтекучести крови предопределяет бесконечное подмножество геометрически возможных конфигураций меньшей мощности, реализующихся в реальных КСС.

Таблица 5

65 теоретически возможных классов конфигураций микрососудистых узлов по виду отношений "больше–меньше–равно" между значениями  $d_i$  и  $\varphi_i$  в конфигурации микрососудистого узла

Вид отношений	$d_1 > d_2 > d_3$	$d_1 > d_3 > d_2$	$d_1 = d_2 = d_3$	$d_1 > d_2 = d_3$	$d_1 < d_2 = d_3$
$\varphi_1 > \varphi_2 > \varphi_3$	$d_1 > d_2 > d_3$ $\varphi_1 > \varphi_2 > \varphi_3$				
$\varphi_1 > \varphi_3 > \varphi_2$					
$\varphi_1 < \varphi_2 < \varphi_3$					
$\varphi_1 < \varphi_3 < \varphi_2$					
$\varphi_2 > \varphi_1 > \varphi_3$					
$\varphi_2 < \varphi_1 < \varphi_3$					
$\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3$					
$\varphi_1 > \varphi_2 = \varphi_3$					
$\varphi_1 < \varphi_2 = \varphi_3$					
$\varphi_1 = \varphi_2 > \varphi_3$					
$\varphi_1 = \varphi_2 < \varphi_3$					
$\varphi_1 = \varphi_3 > \varphi_2$					
$\varphi_1 = \varphi_3 < \varphi_2$					

9) Феномен сверхтекучести крови «запрещает» существование определённого бесконечного подмножества конфигураций внутри вышеуказанного предопределённого подмножества.



**Запрещенные симметричные в плоскости Р конфигурации  
микрососудистого узла**

N	Условия симметрии конфигурации микрососудистого узла в плоскости Р	Группа симметрии Конфигурации Микрососудистого узла в плоскости Р
1	$d_1 = d_2 = d_3$ $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3$	$I_3 3L_2 4P$
2	$d_1 = d_2 \neq d_3$ $\varphi_1 \neq \varphi_2 = \varphi_3$	$L_2 2P$
3	$d_1 \neq d_2 = d_3$ $\varphi_1 = \varphi_2 \neq \varphi_3$	
4	$d_1 = d_2 \neq d_3$ $\varphi_1 = \varphi_2 \neq \varphi_3$	

$I_3$  – одна ось симметрии 3–го порядка,  $3L_2$  – три оси симметрии 2–го порядка,  $4P$  – четыре плоскости симметрии.  $L_2$  – одна ось симметрии 2–го порядка,  $2P$  – две плоскости симметрии

10) КСС обладают энантиоморфизмом, т.е. «левизной» и «правизной» в зависимости от положения по отношению к плоскости билатеральной симметрии тела.

Таблица 7

**Теоретически возможные комбинации отношений вида "больше–меньше–равно" между вероятностями  $P(A_j)$  и  $P(A_j')$  того, что конфигурация случайно выбранного узла в микрососудистой сети из левой или из правой половины тела принадлежит к j–ой зеркальной паре**

Вид отношений	$P(A_j) r = P(A_j') r$	$P(A_j) r > P(A_j') r$	$P(A_j) r < P(A_j') r$
$P(A_j) l = P(A_j') l$	$P(A_j) r = P(A_j') r$ $P(A_j) l = P(A_j') l$		
$P(A_j) l > P(A_j') l$			◇
$P(A_j) l < P(A_j') l$		◇	$P(A_j) r < P(A_j') r$ $P(A_j) l < P(A_j') l$

В реальных микрососудистых сетях правой и левой половины тела возможны только два вида комбинаций отношений между вероятностями  $P(A_j)$  и  $P(A_j')$ , являющиеся количественным выражением структурных свойств микрососудистых сетей левой и правой модификации:

$$P(A_j) r > P(A_j') r$$

$$P(A_j) l < P(A_j') l$$

и

$$P(A_j)r < P(A_j')r$$
$$P(A_j) l > P(A_j') l .$$

13) Феномен сверхтекучести крови предопределяет форму внутреннего просвета узла.

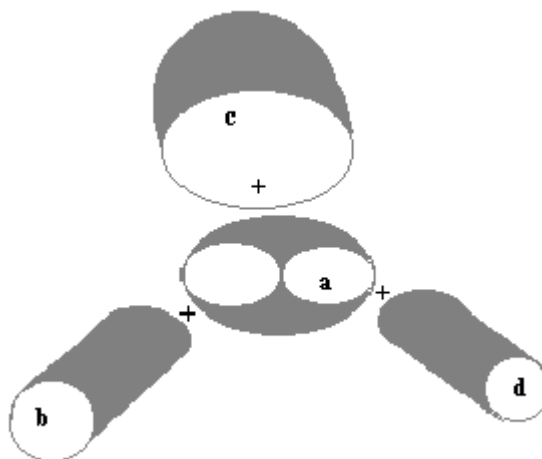


Рис. 11

Геометрическая модель формы просвета микрососудистого узла:  
а – фрагмент эллипсоида; b, c, d – фрагменты круглых цилиндров

14) Феномен сверхтекучести крови предопределяет искривлённость трекеров и цепные реакции подстройки конфигураций узлов под этот феномен.

#### Список литературы

3. Залманов А. С. Тайная мудрость человеческого организма. – Париж, 1958.
4. Козлов В. И., Мельман Е. П., Нейко Е. М., Шутка Б. В. Гистофизиология капилляров. – СПб.: Наука, 1994. – С. 3.
5. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика: учебное пособие. В 10 т. Т. VI. Гидродинамика. – 4-е изд., стер. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – С. 706-730.
- 6.
7. Глотов В. А. Правила Ру и конфигурации микрососудистых бифуркаций. – Биофизика. – 1992. – Т. 37. – Вып. 2. – С. 341-344.

8. Глотов В. А. Структурный анализ микрососудистых бифуркаций. (Микрососудистый узел и гемодинамический фактор). – Смоленск: АО "Амипресс", 1995. – 253 с.
9. Глотов В. А. Принцип симметрии Кюри и конфигурации сосудистых бифуркаций, их симметрия и асимметрия, классификация, энантиоморфизм сосудистых сетей. – Вестник новых медицинских технологий. – 2000. – Т. VII. – №1. – С. 16-20.
10. Глотов В. А. Функциональная анатомия внутреннего просвета кровеносных сосудистых сетей: роль гемодинамического фактора и сил поверхностного натяжения в его формировании, аксиоматический подход. – Однораловские морфологические чтения: сборник материалов Всероссийской научной конференции с международным участием /ФГБОУ ВО «ВГМУ им. Н. Н. Бурденко» Минздрава России. – М.: Издательство «Научная книга», 2019. – С. 48-54.