

МИНИМИЗАЦИЯ ПРИРОДОЙ ЗАТРАТ ЭНЕРГИИ НА ДВИЖЕНИЕ ВОДЫ В КАПИЛЛЯРАХ РАСТЕНИЙ И КРОВИ В КРОВЕНОСНЫХ СОСУДАХ ЖИВОТНЫХ

© 2019 г. Г.С. Ходаков

Москва, Россия

E-mail: fkhodakova@yandex.ru

Поступила в редакцию 08.06.18 г.

После доработки 04.10.18 г.

Принята к публикации 10.10.18 г.

Совершенно очевидно, что природа минимизировала затраты энергии на движения воды в растениях и крови в животных. Однако механизмы осуществления этого принципа до последнего времени оставались неизвестными. Научное их обоснование и решение связанных с ним проблем стало возможным на основе открытого недавно явления сверхтекучести водных растворов. Растения и животные Земли пронизаны капиллярами и сосудистыми системами, по которым движутся жидкости, необходимые для их жизнедеятельности. В почвенной воде и в плазме крови растворены различные минералы; капилляры растений и кровеносные сосуды животных электрически заряжены. Следовательно, имеются условия, необходимые для проявления в них эффекта сверхтекучести. Сверхтекучесть эквивалентна понижению вязкости жидких сред до значений многократно ниже обычных.

Ключевые слова: пористые порошковые мембраны, ксилема деревьев, капилляры, кровеносные сосуды, сверхтекучесть, гидравлическое сопротивление.

DOI: 10.1134/S0006302919010150

Первоначально наше исследование было запланировано как вполне тривиальное и прикладное. Необходимо было оптимизировать методику тампонирувания водоносных пластов нефтяных месторождений с использованием отходов сахарного производства. Работы этого направления обычно производят с геологическими кернами. В наших исследованиях геологические керны моделировали пористыми мембранами, формируемыми из измельченных порошков. Поскольку кварцевый песок составляет основу многих осадочных водо- и нефтеносных пластов, пористые мембраны формировали из измельченного в лабораторной мельнице кварцевого песка. Дисперсность и пористость осадочной породы моделировали степенью измельчения (дисперсности) и уплотнения порошков. Для изготовления мембран использовали цилиндрические кюветы с перфорированным дном и трубками для подвода и отвода исследуемого раствора.

Измеренная экспериментально вязкость водных растворов в капиллярах порошковых мембран оказалась в несколько раз меньше их

вязкости, измеряемой стандартными вискозиметрами. Явление необычное и значительное.

Была тщательно проверена корректность методики измерений и аппаратуры, подробно исследован механизм явления и его особенности, рассмотрены вероятные проявления сверхтекучести в природе окружающего мира и в технологии. Разумеется, первоначальная задача работы была выполнена, но отошла к разряду второстепенных. Результаты исследований явления сверхтекучести растворов в пористых мембранах опубликованы [1–3] и в повторном их изложении в данной работе нет необходимости. Открытие и изучение явления сверхтекучести жидкостей сквозь мембраны, спрессованные из минеральных порошков электрически заряженных частиц (в результате измельчения частицы кварца становятся заряженными), послужило ключом к раскрытию рассмотренных здесь проблемных механизмов потоков жизнеобеспечения в растениях животных. Сверхтекучесть жидкостей и суспензий в пористых телах выгодна для экономии энергии в жизненных процессах. Согласно принципу наименьшего действия, представляется очевидным использование этого явления растениями и животными в их жизнедеятельности.

Сокращение: ГС – гемосопротивление сосудов.

ЗАТРАТЫ ЭНЕРГИИ НА ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАСТЕНИЙ ВОДОЙ, ВОДОРОДОМ И УГЛЕКИСЛЫМ ГАЗОМ (исходная проблематика)

Закономерности и особенности снабжения деревьев и других растений водой изучены экспериментально ботаниками [4–10]. В них отмечены некоторые явления, которые кажутся парадоксальными с позиций классической физико-химии:

1. Некоторые деревья вырастают до высоты 100 м. Обычные деревья средней полосы вырастают до высоты 20–60 м. Деревья поднимают на такую высоту в сутки тонны почвенной воды. Энергия, необходимая для этого процесса, затрачивается на преодоление не только силы тяжести, но в основном на преодоление гидравлического сопротивления капилляров ксилемы деревьев. Принятые трактовки механизма движения воды по капиллярам ксилемы не имеют научного обоснования. Его энергетика остается неизвестной.

2. Деревья и другие растения поглощают очень большое (с позиции целесообразности – принципа наименьшего действия) количество почвенной воды. Только менее 2% воды деревья используют для синтеза органических соединений и питательных растворов. Остальная вода испаряется. Целевое ее назначение остается проблематичным.

3. Для производства органических веществ (в процессе фотосинтеза) наземные растения поглощают из воздуха углекислый газ (CO_2). Его содержание в воздухе составляет примерно 0,03 об. %. Для обеспечения синтеза ежесуточной порции органического вещества (продуктивность растения) необходимо профильтровать через листья сотни и тысячи кубометров воздуха ежесуточно, что физически невозможно. Механизм поступления углекислого газа в систему фотосинтеза не изучен.

4. Растения используют в процессах фотосинтеза водород и выделяют в атмосферу кислород. Доказано изотопным анализом, что эти элементы растения получают в результате диссоциации только молекул воды. Однако в поглощаемой растениями световой энергии (видимом свете) нет квантов, энергии которых было бы достаточно для диссоциации молекул воды. Водоросли и произрастающие в тени растения почти лишены световой энергии. Тем не менее и в них происходят процессы синтеза органических соединений, сопровождаемые выделением кислорода.

Отмеченные здесь парадоксы пытались решить на основе давно изученных явлений. По-

лагают, например, что движение воды по капиллярам ксилемы обусловлено адгезией и когезией, а также осмотическим давлением в живых клетках корней и листве и даже кавитацией. При внимательном анализе оказалось, что эти механизмы [4–10] научно не обоснованы. Адгезия определяет смачивание капилляров водой, а когезия (межмолекулярные в ней связи) – ее поверхностную энергию и вязкость. Силы адгезии направлены перпендикулярно потоку воды и, следовательно, не могут воздействовать на его скорость.

Адгезия и когезия в совокупности составляют основу капиллярных явлений [11]. Высота подъема воды в капиллярах определяется их диаметром и зависит от энергии смачивания (адгезии) жидкостью (водой) и поверхностной энергии воды (когезия). При полном смачивании высоту столбика воды в капилляре определяют по формуле Жюрена. Этим аспектом капиллярных явлений роль адгезии и когезии в водном режиме растений исчерпана [12–15].

Корневое давление, которое приписывают осмосу, экспериментально не обнаружено. Осмос увеличивает поступление в клетки корней почвенной воды (концентрация растворимых веществ в плазме клеток выше, чем в почвенной воде). В нормальных условиях осмотическое давление в клетках уравновешено упругостью клеточных мембран. Осмотическое давление направляет воду внутрь клеток и не оказывает прямого действия на скорость течения испаряемой растениями воды. Как и капиллярные силы смачивания, осмотическое давление определяет только равновесное состояние системы, а не кинетику или динамику течения почвенной воды по капиллярам ксилемы. Синтезированные в листьях органические соединения перекачиваются по капиллярам флоэмы в плоды и семена, питают клетки корней и запасаются в клетках различных частей растения. В основном к этому сводится действие осмотического давления на потоки растворов питательных веществ в растениях. Выделение растительных соков из стволов деревьев в ряде публикации рассматривают как доказательство высоких давлений в ксилеме. Растительные соки содержат сахара и другие органические соединения, которых нет в почвенной воде. Стекают они по флоэме.

Солнечное излучение является поставщиком энергии для всего процесса жизнедеятельности деревьев (но не всех растений). Вода не может подниматься на многометровую высоту под действием относительно ничтожно малого перепада давлений, возникающего вследствие ее

испарения. Испаряемая вода замещается окружаемым воздухом.

Решение перечисленных и других парадоксов из жизни растений стало возможным на основе включения в происходящие в них процессы явления *сверхтекучести* и сопутствующих явлений. Они устраняют не только энергетический парадокс поступления почвенной воды в крону высоких деревьев, но решают и другие отмеченные далее физико-химические парадоксы из жизни растений.

ЭНЕРГЕТИКА ВОДОСНАБЖЕНИЯ РАСТЕНИЙ

Измеренные по снимкам, полученным с помощью электронной и оптической микроскопии, диаметры водопроводящих капилляров ксилемы лиственных деревьев в среднем близки к $14,5 \pm 0,24$ мкм, а хвойных – к $11,1 \pm 0,01$ мкм [9]. По другим данным [8,10] они составляют 5–7 мкм. Обусловленная смачиванием высота равновесного столбика воды в них по формуле Жюрена составляет приблизительно 2–3 м. Смачивание стенок капилляров водой не решает проблему доставки воды к кроне дерева. Согласно экспериментальным измерениям, обычное дерево, например клен (высота ≈ 20 м), поглощает ≈ 2 тонны воды в сутки. Объемная скорость движения воды $\approx 2,3 \cdot 10^{-5}$ м³/с.

Средняя величина диаметра капилляров лиственных деревьев равняется $\approx 14,5 \cdot 10^{-6}$ м, площадь сечения капилляра – $1,65 \cdot 10^{-10}$ м². Площадь сечения ксилемы дерева принята равной 0,05 м², объем ксилемы дерева – $0,05 \times 20 \cdot 10^{-5}$ м³/с ≈ 1 м³. Площадь поперечного сечения стенок капилляров принята равной площади сечения капилляров, суммарная площадь поперечного сечения капилляров – $0,05/2 = 0,025$ м² = 250 см². Число капилляров на площади сечения дерева составляет $0,05 \times (2 \times 1,65 \cdot 10^{-10})^{-1} = 1,5 \cdot 10^8$. Объем капилляра составляет $1,65 \cdot 10^{-10}$ м² $\times 20$ м = $3,3 \cdot 10^{-9}$ м³, а объем воды во всех капиллярах клена $\approx 0,5$ м³. Линейная скорость движения воды в капиллярах $\approx 2,3 \cdot 10^{-5}$ м³/с / $0,025$ м² $\approx 9,2 \cdot 10^{-4}$ м/с. Высокая линейная скорость движения воды в капиллярах ксилемы свойственна не только клену. Измерены линейные скорости движения воды в осине и березе, они равняются $3,4 \cdot 10^{-4}$ м/с, в яблоне – $3 \cdot 10^{-4}$ м/с, в кукурузе – $1 \cdot 10^{-4}$ м/с.

Если полагать капилляры прямолинейными и одинаковыми по сечению по всей их длине, согласно формуле Пуазейля необходим перепад

давления, равный $\Delta P = Qn^{-1} \lambda \cdot 128\mu \cdot (\pi d^4)^{-1} = 2,3 \cdot 10^{-5} \cdot (3 \cdot 10^7)^{-1} \cdot 20 \times 128 \cdot 10^{-3} \cdot (3,14 \times 4,4 \cdot 10^{-20})^{-1} \approx 15 \cdot 10^6$ Па = 150 атм. (Обозначения: атмосферное давление $P = 10^5$ Па; Q – поток жидкости, м³с⁻¹; n – число капилляров в поперечном сечении, λ – высота дерева, м; $\mu = 10^{-3}$ – вязкость воды, Па·с; d – средний диаметр капилляров, м.)

Фактически же капилляры ксилемы дерева по всей длине разделены тонкими поперечными перегородками с отверстиями значительно меньшего, чем диаметр капилляров, размера. Расстояние между перегородками составляет примерно 0,2–0,3 м. Эти перегородки значительно повышают гидравлическое сопротивление ксилемы. Они являются важнейшим конструктивным элементом, определяющим механизм подъема воды на высоту дерева.

Такое высокое давление воды невозможно обеспечить никаким известным природным механизмом. Экспериментально такие механизмы и такое давление не обнаружены.

Без учета явления сверхтекучести затрачиваемая на преодоление гидравлического сопротивления мощность «подъемника» воды в клене должна бы равняться $W = 150 \times 250 \times 9,2 \cdot 10^{-4} = 35$ Вт.

Работа перемещения воды в капиллярах ксилемы дерева от корней до вершины (20 м), где давление атмосферное (градиент давления по высоте дерева принят линейным), за сутки равна $0,5 \times 35 \times 8,6 \cdot 10^4 \approx 1,5 \cdot 10^6$ Дж, тогда как расчетная величина энергии, необходимой для подъема двух тонн воды на высоту 20 м, составляет $2 \cdot 10^3$ кг $\times 20$ м = $4 \cdot 10^4$ кгм $\approx 4 \cdot 10^5$ Дж – в 4,8 раз меньше, чем на преодоление гидравлического сопротивления капилляров. Расчетная величина сверхтекучести почвенной воды в капиллярах ксилемы оказалась существенно выше сверхтекучести водных растворов в изученных нами порошковых мембранах.

МЕХАНИЗМ ПОСТУПЛЕНИЯ ВОДОРОДА В РАСТЕНИЯ

Из логического анализа механизмов подъема воды на всю высоту деревьев следует, что единственно возможным из них в природных условиях является газлифтинг, для которого газ вырабатывается в капиллярах дерева. Возможность получения гремучего газа при малой разности напряжений обоснована теоретически и показана экспериментально [16]. Согласно механизму газлифтинга, чтобы поднимать воду в капиллярах ксилемы с необходимой скоростью, объем образуемого в них газа при атмосферном

давлении должен быть не менее объема транспортируемой воды.

Внутренние стенки капилляров электрически заряжены (необходимое условие). Следовательно, природа решает одновременно и с наименьшими затратами энергии две задачи – подъем воды в растениях и снабжение системы фотосинтеза необходимым для производства органических материалов водородом. Мембраны клеток листьев пропускают в них только водород. Не утилизируемый растениями кислород выделяется в атмосферу. Факт электрического (отрицательного) заряда на внутренних стенках капилляров (1,0–1,5 В) установлен прямыми измерениями [12–15,17]. Электрические слои образуются на границе фаз в клеточных мембранах и биологических капиллярных системах. Измеренное в них слабое электрическое поле только разделяет ионы, образуемые в актах диссоциации молекул воды тепловыми соударениями молекул (в соответствии с максвелловским распределением молекул по скоростям) за счет энергии теплового поля окружающей среды [16]. Показано, что ионизация слабого водного раствора минеральных и органических компонентов возникает и под действием теплового излучения [18,19]. В серии публикаций изложена концепция бабстонов, определяющих свойства воды и водных растворов [19–21]. Однако в данной работе исследовано только изменение свойств (вязкости) водных растворов под действием слабого электрического поля в капиллярах. Вязкость воды и водных растворов вне такого поля, измеренная капиллярными вискозиметрами, и в капиллярах мембран, но без электрического заряда на капиллярах, была вполне табличной.

Вблизи отрицательно заряженной поверхности капилляров ионы водорода образуют молекулы водорода, а в осевой области капилляров гидроксилы образуют пероксид водорода H_2O_2 , который распадается на воду и кислород с образованием молекул кислорода O_2 . (Явление биологического электричества известно со времен Гальвани и Вольта.) Гремучий газ накапливается в капиллярных камерах (под поперечными перегородками). Когда газа в камере накапливается достаточно много и давление в пузырьке газа становится больше веса столбика запирающей его воды, он выталкивает вышерасположенный столбик воды по направлению к вершине дерева и движется в том же направлении, попадая в конце своего пути в листья. Мембраны (оболочки) клеток пропускают в клетки листьев водород, который в процессе фотосинтеза растения используют для производства органической массы, кислород выделяется в атмосферу.

Согласно закономерностям процесса газлифтинга, поступающего в клетки листьев водорода вполне достаточно для обеспечения продуктивности растений по производству ими биомассы. Данный механизм поступления водорода в систему фотосинтеза исключает необходимость его производства в фотосистеме II по схеме, предполагающей накопление энергии двумя органическими молекулами и синхронной ее реализации для диссоциации молекул воды. Этот механизм не имеет ни теоретического, ни экспериментального обоснования.

МЕХАНИЗМ ИЗВЛЕЧЕНИЯ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА ИЗ ВОЗДУХА

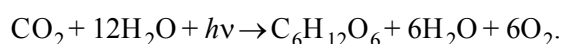
Целесообразность и механизм использования растениями большого количества почвенной воды все еще проблематичны. Часто полагают, что «вода нужна для охлаждения листьев». Это положение предельно несостоятельно. В теплицах, где температура на несколько градусов выше температуры наружного воздуха, растения продуктивнее, чем вне теплиц. Наряду с этим механизм извлечения листьями углекислого газа из воздуха также не имеет научного обоснования.

В воздухе содержится $\approx 0,03$ об. % углекислого газа, т.е. в кубометре воздуха содержится $\approx 3 \cdot 10^{-4}$ м³ углекислого газа, удельная масса которого составляет $\approx 5,5 \cdot 10^{-4}$ г/м³. Удельное содержание углерода в воздухе составляет $\approx 1,5 \cdot 10^{-4}$ г/м³. Для извлечения из воздуха углерода, количество которого достаточно для синтеза органической массы, дереву необходимо обработать объем воздуха, равный $\approx (1,5 \cdot 10^{-4})^{-1}$ м³/г $\approx 7 \cdot 10^5$ м³/г $\approx 7 \cdot 10^8$ м³/кг. Продуктивность дерева по углероду составляет ≈ 2 кг в сутки. Для ее обеспечения необходимо извлекать углекислый газ из воздуха объемом $\approx 1,4 \cdot 10^9$ м³ в сутки. Если принять, что в сутках ≈ 15 светлых часов, скорость обработки воздуха листьями составляет $\approx 9,3 \cdot 10^6$ м³/ч = $2,6 \cdot 10^3$ м³/с. Согласно опубликованным данным, средняя площадь листы дерева принята равной 724 м². В этом случае расчетная скорость обработки воздуха деревом составит $2,6 \cdot 10^3 / 724 \approx 3,6$ м/с. Такая интенсивность прокачки воздуха через листья (столбика воздуха высотой 360 см в секунду) физиологически невозможна. Логично полагать, что CO_2 извлекают из воздуха рецепторы на поверхности листьев. Именно для этого им необходима поступающая из почвы вода (2 т в сутки, 133 кг в час, 0,04 кг/с). В воде на поверхности листьев растворяется углекислый газ и образуется углекислота, которая за-

тем впитывается клетками листьев. Углерод усваивается в процессе фотосинтеза, лишняя вода испаряется.

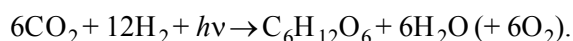
УРАВНЕНИЕ ФОТОСИНТЕЗА

Согласно принятым в настоящее время представлениям, в процессе фотосинтеза молекулы воды разделяются на водород и кислород под действием световой энергии. Водород используется в процессе фотосинтеза. Основное уравнение фотосинтеза принято в следующем виде:



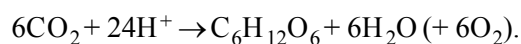
Фактически же образованные в результате тепловой диссоциации молекул воды ионы водорода и кислорода разделяются в электрическом поле капилляров и образуют гремучий газ. Клетки листьев извлекают из него водород и выделяют в атмосферу кислород.

Из атмосферы листья поглощают углекислый газ. Объемы поглощенного углекислого газа и выделяемого в воздух кислорода равны. Следовательно, на одну молекулу поглощенного углекислого газа приходится две молекулы присоединенного водорода. Когда процесс фотосинтеза происходит с участием молекулярного водорода, соотношение между количествами поглощенного углекислого газа и водорода остается тем же, что принято в уравнении фотосинтеза. Уравнение фотосинтеза этого процесса:



Световая энергия не затрачивается на диссоциацию молекул воды. Она используется на диссоциацию молекул углекислого газа, сорбированных хлоропластами.

Травянистые растения и многие кустарники не нуждаются в транспорте воды на большую высоту и могут обходиться без газлифтинга. В таких растениях водород попадает в листья в виде ионов, которые образуются в капиллярах. Молекулярный водород в таких растениях не успевает образоваться. Для синтеза органических соединений достаточно тепловой энергии окружающей среды. Использующие этот механизм растения произрастают в затененных местах, также и под водой (водоросли) и в лишенных солнечного света пещерах. Основное уравнение фотосинтеза для них можно записать в следующем виде:



Замечание. Некоторые используемые живой природой способы жизнеобеспечения известны в современной технологии. Однако сам факт

«технической» основы применяемых живой природой механизмов казался (невольнo, как инерция мышления) несовместимым с живой материей. Согласно изложенному выше, живые организмы используют некоторые вполне технологические механизмы: для движения потоков питающих сред используют эффект сверхтекучести, тепловую диссоциацию молекул воды и разделение ионов в электрическом поле для производства водорода, для транспорта воды на большую высоту применяют газлифтинг.

ОСОБЕННОСТИ СВЕРХТЕКУЧЕСТИ КРОВИ

В первом этюде было показано как энергетически выгодный эффект сверхтекучести и сопутствующие ему эффекты используют растения. Животные в своей жизнедеятельности согласно все тому же принципу наименьшего действия неизбежно также должны были ими воспользоваться.

Вязкость суспензий, в частности, крови зависит от скорости сдвига их течения. С увеличением скорости сдвига вязкость крови, равно как и других водных суспензий, уменьшается и при достаточно высокой скорости сдвига становится практически постоянной величиной. Ее течение становится ньютоновским и ламинарным. Реосопротивление сосудов, по которым протекают суспензии, при этом минимально. Поэтому сравнение показателей вязкости суспензий (пуаз, стокс) корректно, когда скорость сдвига превышает некоторое «пороговое» значение. «Пороговая» скорость сдвига нормальной крови, как установлено экспериментально, составляет примерно 200 с^{-1} , тогда как по сосудам кровеносной системы кровь перемещается со скоростями сдвига более 1000 с^{-1} [19]. Кровь в кровеносной системе – заведомо ньютоновская жидкость, ее поток – ламинарный [22]. Гемореология учитывает эти особенности крови и кровеносной системы. Согласно опубликованным данным [18], экспериментально измеряемая стандартными приборами вязкость крови значительно ниже вязкости минеральных суспензий с равным содержанием дисперсной фазы. Из-за сверхтекучести вязкость крови в кровеносной системе (реосопротивление сосудов кровеносной системы) меньше вязкости воды и в десятки и сотни раз меньше вязкости равно наполненных водных минеральных суспензий. Вязкость плазмы ($\mu_{\text{П}}$) крови зависит от содержания в ней минеральных солей и органических веществ. Она варьирует от $\mu_{\text{П}} = 1,2 \mu_{\text{В}}$ до $2,2 \mu_{\text{В}}$ и далее принята равной $2 \mu_{\text{В}}$ ($\mu_{\text{В}}$ – коэффициент вязкости воды при темпе-

ратуре измерения, равный 10^{-3} Па·с при температуре 20–40°C). Кровь представляет собой суспензию в плазме форменных элементов, в основном эритроцитов (нормальный гемокрит $\varphi \approx 0,45$). Согласно показаниям вискозиметров разных модификаций, при 20–40°C вязкость нормальной крови $\mu_K \approx 4,2\text{--}6,0 \mu_B$, в среднем $\mu_K \approx 5 \mu_B$ (при анемии $\mu_K \approx 2\text{--}3 \mu_B$, при полицитемии $\mu_K \approx 15\text{--}20 \mu_B$). Плотность крови равна $\rho = 1,05 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ [19,22].

Вязкость крови (гемосопротивление сосудов – ГС) – величина необычайно низкая по сравнению с вязкостью минеральных суспензий равной степени наполнения дисперсной фазой. Например, вязкость водной суспензии угля (средние размеры частиц 7–10 мкм, плотность $1,3 \text{ г/см}^3$, что близко к размерам и плотности эритроцитов) составляет $\mu_C \approx 200\text{--}500 \mu_B$; конкретные ее значения зависят от гигроскопичности угольных частиц, применяемых поверхностно-активных веществ, содержания и свойств минеральных включений [22,23]. Необычайно низкую вязкость крови или, что эквивалентно, низкое гемосопротивление сосудов ее течению, часто трактуют как следствие дискообразной формы и эластичности эритроцитов. Ссылаются также на свойственные всем суспензиям закономерности – на уменьшение вязкости с увеличением скорости сдвига, на зависимость формально измеряемой вязкости от диаметра капилляра или величины зазора в ротационных вискозиметрах (т.е. вариабельности скорости сдвига по сечению потока).

Убедительных обоснований трактовки механизма низкой вязкости крови по сравнению с равно наполненными минеральными суспензиями всеми приведенными здесь «наглядными» факторами нет. На основании тщательного анализа опубликованных исследований можно сделать вывод, что истинная природа сравнительно низкой вязкости крови (сопротивления сосудов движению крови) гемореологам неизвестна.

Плазма крови (водный раствор солей и водорастворимых органических соединений) содержит вещества, которые адсорбируются на рабочих поверхностях вискозиметров в виде поляризованных слоев. Тем самым в вискозиметре реализуется первое необходимое условие для проявления эффекта сверхтекучести крови. Поверхность эритроцитов крови (соответственно и прилегающая к ним плазма крови) заряжена отрицательно – выполняется второе необходимое условие проявления эффекта сверхтекучести.

Энергетически выгодная сверхтекучесть крови в кровеносной системе решает парадокс

несоответствия мощности сердца как гидравлического насоса и очень большого объема и скорости перекачиваемой им крови. Измеренные значения мощности сердца человека оценивают от $\approx 0,3$ до ≈ 3 Вт, наиболее часто приводят значение в примерно 0,8 Вт. При такой малой мощности сердце перекачивает по очень разветвленной кровеносной системе с большой скоростью громадные объемы крови.

Структура кровеносной системы животных и происходящие в ней процессы очень сложны. Кровеносные сосуды эластичны, кровь в них поступает импульсно и изменяет их диаметр. Длины сосудов отдельных классов не строго одинаковы и в ряде случаев неточно измерены. Градиенты давлений крови меняются во времени. Точные гидравлические расчеты с учетом всех особенностей кровеносной системы практически невозможны.

Разработаны различные модели кровеносной системы, построенные, в частности, на их аналогии с электрическими цепями. Для оценки величины эффекта сверхтекучести крови оказалось целесообразным кровеносную систему представить в виде системы трубок, диаметры и длина которых соответствуют усредненным параметрам аорты, артерий, артериол, капилляров, венул и вен. Кровоток в кровеносной системе принят соответствующим усредненным данным среднестатистического человека. В такой упрощенной модели кровообращения ее элементы (классы сосудов) соединены последовательно и замкнуты на сердце, а все сосуды каждого класса соединены параллельно, одинаковы по диаметру и длине. Данная модель адекватно представляет существенные для оценки величины эффекта сверхтекучести крови основные гидравлические параметры кровеносной системы и не предназначена для решения других задач.

Объемная скорость кровотока по большому и малому кругам кровообращения экспериментально измерена. В среднестатистическом организме здорового человека помещается примерно 5–7, в среднем 6 л крови, из которых 84% (от 4,2 до 6 л), в среднем 5 л, циркулирует в большом круге кровообращения и в среднем 1 л – в малом. Измеренная длительность одного цикла потока крови по большому кругу кровообращения составляет 20–25 с, по малому кругу – примерно 7 с.

Сердце в нормальных условиях перекачивает в среднем 20 тыс. литров (до 21 т) крови в сутки по большому кругу и 12,3 (до 13) тыс. литров – по малому кругу кровообращения. Таким образом, сердце перекачивает примерно

33 т крови в сутки с объемной скоростью $\approx 1,4$ т/ч $\approx 0,4$ кг/с.

Известны или могут быть вычислены длины кровеносных сосудов (L), средние значения градиентов давлений на них ($\Delta P/L$) и суммарные площади сечения однородных сосудов – аорты, артерий, артериол, капилляров, венул и вен. Средние длины сосудов и средняя линейная скорость кровотока (V) вычислены по содержанию (q) крови в сосудах данной группы, объемной скорости кровотока (V , см³/с) в каждом из кругов кровообращения и суммарной площади сечения (S) сосудов данной группы в большом и малом кругах.

Для определенности в дальнейших расчетах принято, что в большом круге кровообращения человека находится 5 л крови, период ее обращения ≈ 21 с. Объемная скорость кровотока в большом круге составляет:

$$V_B = 5000/21 = 238 \text{ см}^3/\text{с} = 238 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}.$$

По малому кругу кровообращения циркулирует 1 литр крови с периодом 7 с. $V_M = 1000/7 = 143 \text{ см}^3/\text{с} = 143 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}.$

Легко убедиться, что варьирование величин q , L , S , V в пределах, допустимых по экспериментальным данным, не изменяет в заметной мере приведенные результаты расчетов вязкости (ГС) крови и ее сверхтекучести ни в одной из групп сосудов кровеносной системы.

Аорта и артерии. Средняя площадь сечения аорты составляет $S_A \sim 4,5 \text{ см}^2$, градиент давления на аорте очень мал и линейная скорость течения крови в аорте такая же, как в артериях (экспериментально измеренные линейные скорости течения крови в них почти одинаковы). Суммарная площадь сечения артерий (S_{AP}) практически равна площади сечения аорты (принято $S_{AP} \approx 5 \text{ см}^2$). В аорте и в крупных артериях сосредоточено примерно 10–12% суммарного объема крови организма человека (принято $q_{Ah} = 700 \text{ см}^3$).

Линейная скорость течения крови в артериях – $V_A = V_B/S_A = 238/5 = 0,48 \text{ м/с}$, что близко к экспериментально измеренному значению (0,5 м/с). Средняя длина аорты и артерий человека $L_A = q_A/S_A = 700/5 = 1,4 \text{ м}$, из которых длина артерий составляет примерно 0,7 м (поскольку площадь сечения аорты примерно равна суммарной площади сечения артерий). Средний диаметр артерий равен $D_A = 4,5 \text{ мм} = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Разность давления крови на сердечном входе и артериальном выходе составляет: $\Delta P = 1,2 \text{ кПа}$. Таким образом,

$$\mu_{KA} = \Delta P D^2 (32VL)^{-1} = 1,2 \cdot 10^3 (4,5 \cdot 10^{-3})^2 (0,7 \cdot 32 \times 0,48)^{-1} \approx 2,3 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с} = 2,3 \mu_B.$$

В артериях вязкость нормальной крови ($\varphi \approx 0,45$, $\mu_{\Pi} = 2,3 \mu_B$) лишь немного превышает вязкость плазмы. Коэффициент сверхтекучести крови в артериях организма относительно измеренной вискозиметром вязкости ≈ 2 . Вязкость крови в артериях (ГС артерий) меньше вязкости суспензий в плазме с минеральной дисперсной фазой в 70 раз. Артериальная часть продолжительности кровяного цикла составляет: $t = 1,4/0,48 = 2,9 \text{ с}$.

Если, как известно, в нормальных условиях организм использует не всю площадь сечения сосудов, то эффект сверхтекучести крови в артериях больше здесь приведенного. Это замечание относится ко всем группам сосудов кровеносной системы.

Артериолы. Из артерий кровь с объемной скоростью $V_B = 238 \text{ см}^3/\text{с} = 238 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ поступает в артериолы. Средний диаметр артериол большого круга кровообращения оценивают равным $D_{AP} = 30 \text{ мкм} = 30 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, суммарная площадь их сечения (просвет) в большом круге: $S_{AP} = 300 \text{ см}^2 = 3 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$. Соответственно средняя линейная скорость течения крови в артериолах равняется

$$V_{AP} = Q_B/S_{AP} = 238 \cdot 10^{-6} (3 \cdot 10^{-2})^{-1} = 0,79 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}.$$

В артериолах помещается $\sim 7\%$ объема крови, принято $q_{AP} = 450 \text{ см}^3$. Средняя разность давления крови на концах артериол большого круга $\Delta P_{AP} = 4,7 \text{ кПа}$. Средняя длина артериол $L_{AP} = q_{AP}/S_{AP} = 450/300 \approx 1,5 \text{ см} = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$. Согласно этим данным, вязкость нормальной крови в артериолах (ГС артериол) равна: $\mu_{AP} = 4,7 \cdot 10^3 (1,5 \cdot 10^{-2})^{-1} (30 \cdot 10^{-6})^2 (32 \times 0,79 \cdot 10^{-2})^{-1} = 1,1 \text{ Па} \cdot \text{с} = 1,1 \mu_B$. Это в четыре с половиной раза меньше вязкости нормальной крови и в 180 раз меньше вязкости минеральной суспензии в плазме крови. Артериальная часть длительности цикла равна $t = 1,5 \cdot 10^{-2} / 0,79 \cdot 10^{-2} = 1,9 \text{ с}$.

Капилляры большого круга кровообращения. Площадь поперечного сечения (S) капилляров большого круга кровообращения $\approx 2500 \text{ см}^2$. Линейная скорость течения крови в капиллярах $V_K = V_B/S_K = 238 \cdot 10^{-6} (0,25)^{-1} = 0,95 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$. Средняя длина капилляров, в которых сосредоточено 400 см^3 крови, $L_K = q_K/S_K = 400(2500)^{-1} = 0,16 \text{ см} = 0,16 \cdot 10^{-2} \text{ м}$. Диаметр капилляра принят равным $D_K = 7 \text{ мкм}$. Разность давлений на капиллярах $\Delta P_K = 1,5 \text{ кПа}$. Вязкость крови в капиллярах $\mu_{KK} = (\text{ГС}_K) = \Delta P L^{-1} D^2 (32V)^{-1} = 10^3 (0,16 \cdot 10^{-2})^{-1} (7 \cdot 10^{-6})^2 (0,95 \times 32 \cdot 10^{-3})^{-1} = 1,5 \mu_B$, что в 3,3 раза меньше вязкости (ГС) нормальной крови и в 130 раз

Таблица 1. Суммарные данные о сверхтекучести крови в кровеносной системе

Виды сосудов	S , см ²	q , см ³	V , м/с	L , см	D , мм	ΔP , кПа
Артерии	5	700	0,48	140	4,5	1,2
Артериолы	300	450	$8 \cdot 10^{-3}$	1,5	0,03	4,7
Капилляры большого круга	2500	400	$1 \cdot 10^{-3}$	0,16	0,007	1,5
Венулы	600	400	$4 \cdot 10^{-3}$	0,7	0,002	1,5
Вены	10	3000	0,24	300	5	1,3
Капилляры малого круга	2500	1000	$6 \cdot 10^{-4}$	0,4	0,007	1,5

меньше вязкости минеральной суспензии. $t = 0,16 \times 10^{-2} / 0,95 \times 10^{-3} = 1,7$ с.

В ряде публикаций приведены несколько другие данные о средней длине капилляров: $L_K = 750$ мкм = $0,75 \cdot 10^{-3}$ м. Скорость движения крови в капиллярах оценивают $V_K = 2$ мм/с = $2 \cdot 10^{-3}$ м/с, а перепад давления $\Delta P_K = 2$ кПа. Длительность прохождения крови в капилляре оценивают 1 с. Если принять скорость течения крови в капиллярах равной 2 мм/с, то вязкость крови в капиллярах: $\mu_{KK} = 2 \cdot 10^{-3}$ Па·с = $2 \mu_B$, практически, как и в предыдущем расчете.

Венулы. В венулах постоянно находится $\approx 7\%$ крови организма: $q_{BE} \approx 400$ см³. Кровь течет по венулам под действием разности давлений $\Delta P_{BE} = 1,5$ кПа. Средний диаметр венул составляет $D_{BE} = 20$ мкм = $20 \cdot 10^{-6}$ м, суммарная площадь поперечного сечения венул равна: $S_{BE} = 6 \cdot 10^{-2}$ м². Линейная скорость течения крови по венулам: $V_{BE} = V_B / S_{BE} = 238 \cdot 10^{-6} (6 \cdot 10^{-2})^{-1} = 0,4 \cdot 10^{-2}$ м/с. Средняя длина венул: $L_{BE} = q_{BE} / S_{BE} = 400(600)^{-1} = 0,7$ см = $0,7 \cdot 10^{-2}$ м. Согласно этим данным, вязкость крови в венулах (ГС венул): $\mu_{BE} = \Delta P L^{-1} \times D^2 (32V)^{-1} = 1,5 \cdot 10^3 (0,7 \cdot 10^{-2})^{-1} (20 \cdot 10^{-6})^2 (32 \times 0,4 \cdot 10^{-2})^{-1} = 0,7 \times 10^{-3}$ Па·с = $0,7 \mu_B$.

Сверхтекучесть крови в венулах равна 7, а относительно минеральной суспензии в плазме – 290. Венульная часть длительности цикла: $t = 0,7 \cdot 10^{-2} / 0,4 \cdot 10^{-2} = 1,8$ с.

Вены. Суммарную площадь сечения вен оценивают примерно в $S_B \approx 10$ см², средняя линейная скорость потока в них крови: $V_{BH} = V_B / S_{BH} = 238 \cdot 10^{-6} (10^{-3})^{-1} = 0,24$ м/с. Диаметр просвета вены: $D_{BH} = 5$ мм = $5 \cdot 10^{-3}$ м. В венах большого круга помещается 50% крови ($q_{BH} = 3000$ см³), и средняя длина вен должна быть равной: $L_{BH} = q_{BH} / S_{BH} = 3000 \cdot 10^{-1} = 3$ м. Разность давления на венах составляет: $\Delta P_{BH} = 1,3$ кПа. Вязкость крови в венах: $\mu_{BH} = \Delta P L^{-1} D^2 (32V)^{-1} = 1,3 \cdot 10^3 (3)^{-1} (5 \cdot 10^{-3})^2 (32 \times 0,24)^{-1} = 1,41 \cdot 10^{-3}$ Па·с = $1,4 \mu_B$. Вязкость крови в венах

почти вчетверо меньше вязкости нормальной крови и в ≈ 142 раза меньше вязкости минеральной суспензии в плазме. Венульная часть длительности цикла: $t_{BH} = 3 / 0,24 = 12,5$ с.

Капилляры малого круга кровообращения.

Объем крови в капиллярах малого круга $q_{KM} \approx 1000$ см³. Средняя величина разности давлений на этих капиллярах $\Delta P_{KM} = 1,5$ кПа. $V_{KM} = 1000 / 7 = 143$ см³/с = $143 \cdot 10^{-6}$ м³/с. Диаметр капилляров принят равным $D_{KM} = 7$ мкм = 7×10^{-6} м. Суммарная площадь сечения капилляров $S_{KM} = 2500$ см² = $0,25$ м². Линейная скорость течения крови в капиллярах малого круга $V_{KM} = V_{KM} / S_{KM} = 143 \cdot 10^{-6} (0,25)^{-1} = 5,7 \cdot 10^{-4}$ м/с. Средняя длина капилляров $L_{KM} = q_{KM} / S_{KM} = 1000(2500)^{-1} = 0,4$ см = $0,4 \cdot 10^{-2}$ м. Вязкость крови в капиллярах малого круга (ГС): $\mu_{KM} = 1,5 \cdot 10^3 (0,4 \cdot 10^{-2})^{-1} (7 \cdot 10^{-6})^2 (32 \times 5,7 \cdot 10^{-4})^{-1} = 1,0 \cdot 10^{-3}$ Па·с = $1 \mu_B$. Эффект сверхтекучести крови в капиллярах малого круга относительно ее вязкости вне организма равен ≈ 5 , а относительно вязкости минеральной суспензии в плазме того же наполнения ≈ 200 .

СУММАРНЫЕ ДАННЫЕ О СВЕРХТЕКУЧЕСТИ КРОВИ В КРОВЕНОСНОЙ СИСТЕМЕ

Согласно результатам расчетов по принятой здесь модели кровеносной системы (табл. 1) ГС капилляров больше ГС других сосудов кровеносной системы. Это логично, поскольку эритроциты, согласно их физиологическому назначению, соизмеримы (имеют тот же порядок) с диаметром капилляров. Они непосредственно контактируют с внутренней поверхностью капилляров, возможно, через тонкие прослойки плазмы. Эффект сверхтекучести в капиллярах наименьший. Он составляет 3,3 относительно вязкости крови по вискозиметру и 130 относительно вязкости водной минеральной суспензии. Рассчитанная по приведенным данным (табл. 1) суммарная длительность цикла оборота крови в кровеносной системе большого круга состав-

Таблица 2. Кровоток в сосудах большого круга

Виды сосудов	P , кПа	ΔP , кПа	N , Дж
Артерии	10,7	1,2	7
Артериолы	9,5	4,7	0,4
Капилляры	4,8	1,5	1,7
Венулы	3,3	1,5	1,0
Вены	1,8	1,3	1,1
Сумма		10,2	11,2

ляет 20,8 с, что практически совпадает с принятым в публикациях периодом кровообращения ≈ 21 с.

На текучесть (вязкость) крови оказывают существенное влияние те же факторы, что и на текучесть и сверхтекучесть водных растворов минеральных суспензий. Так, например, доля поверхностно-активных веществ, составляя 0,003–0,01 масс. % от массы суспензии, уменьшает вязкость концентрированных минеральных суспензий в десятки раз при всех изученных скоростях сдвига [22–28] (по измерениям ротационными вискозиметрами). Растворение в воде 0,1 масс. % полисахаридов увеличивает гидродинамическое сопротивление пористых мембран из кварцевых порошков более чем в пять раз [28].

Суспензия эритроцитов в плазме отличается от модельных минеральных суспензий своеобразным проявлением эффекта сверхтекучести. Эффект сверхтекучести крови значителен, согласно аппаратным измерениям, и особенно велико его значение в организме. Несомненно, что плазма крови содержит поверхностно-активные вещества, способствующие сверхтекучести крови.

Промышленное использование поверхностно-активных веществ в приготовлении и применении суспензий хорошо известно. Малые концентрации поверхностно-активных веществ масштабно используют, например, в технологии нефте- и газодобычи для регулирования водотоков в водоносных пластах.

МОЩНОСТЬ И РАБОТА СЕРДЦА

Сердце – пульсовый насос. Направленность движения крови по двум кругам кровеносной системы обеспечивают установленные в них и в сердце клапаны. На основании приведенных данных можно оценить мощность и работу, затрачиваемую сердцем на движение крови (табл. 2). Артериальное давление крови принято равным 80 мм рт. ст. (10,7 кПа). Изменение давления крови вдоль сосудов в расчетах пред-

полагается линейным. Согласно принятой здесь модели кровеносной системы энергия, затрачиваемая сердцем на один цикл в большом круге кровообращения, $\approx 11,2$ Дж, соответственно развиваемая им мощность в течение цикла длительностью 21 с $\approx 0,5$ Вт. Мощность потока крови в артериях – наибольшая. Она в восемь раз превосходит мощность потока крови в венах.

Артериальное давление крови в малом круге кровообращения составляет в среднем ≈ 2 кПа, а венозное ≈ 1 кПа. Соответственно энергия, затрачиваемая сердцем в малом круге кровообращения в течение одного цикла, $\approx 1,8$ Дж, а мощность потока крови $\approx 0,3$ Вт. Суммарную мощность сердца можно оценить как $\approx 0,8$ Вт.

Сверхтекучесть крови в кровеносной системе понижает необходимую мощность сердца примерно в 200 раз. Без сверхтекучести человеку требовалось бы сердце мощностью 160 Вт. Организм человека не в состоянии обеспечить питанием сердце мощностью ≈ 160 Вт и справиться с выделением соответствующего этой мощности тепла. Кровеносная система с таким сердцем была бы полностью тромбирована.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поверхности капилляров растений и кровеносных сосудов животных электрически заряжены. В сочетании с ионным составом и поверхностно-активными веществами это определяет эффект сверхтекучести потоков жидких сред. Эффект сверхтекучести многократно уменьшает затраты энергии на процессы жизнеобеспечения растений и животных.

Открыты и обоснованы механизмы движения по капиллярам растений почвенной воды, получения растениями водорода для фотосинтеза и извлечения с той же целью листьями растений углекислого газа из воздуха. Обосновано основное уравнение фотосинтеза. Подбором минерального состава почвенной воды можно увеличить продуктивность растений.

Эффект сверхтекучести является определяющим фактором реологии крови в кровеносной системе. Сердце животных работает как пульсовый насос и отличается малой мощностью для необычайно большой скорости и объема перекачиваемой им крови. Исследование открывает возможности улучшения физиологических функций кровообращения посредством целенаправленной координированной коррекции состава крови и электрофизических свойств кровеносной системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Г. С. Ходаков, Теорет. основы хим. технологии **38** (4), 456 (2004).
2. Г. С. Ходаков, Рос. хим. журн. **47** (2), 33 (2003).
3. Н. И. Редькина и Г. С. Ходаков, Рос. хим. журн. **44** (3), 39 (2002).
4. *Биологический энциклопедический словарь*, под. ред. М. С. Гилярова, А. А. Бабаева, Г. Г. Винберга и Г. А. Заварзина, 2-е изд., испр. (Сов. энциклопедия, М., 1986).
5. П. Д. Крамер и Т. Т. Козловский, *Физиология древесных растений* (Мир, М., 2003).
6. M. A. Zwieniecki and N. M. Holbrook, *Plant Physiol.* **123**, 1015 (2000).
7. C. J. Zimmer, *Natural History*, October, 36 (2000).
8. S. G. Saupe, *Plant Physiol.* **327**, 36 (2006).
9. D. M. Gorsuch, S. F. Oberbauer, and J. B. Fisher, *Am. J. Botany*, № 88, 1643 (2001).
10. M. A. Zwieniecki, P. J. Melcher, and N. M. Holbrook, *J. Exp. Botany* **52** (355), 257 (2001).
11. Б. В. Дерягин, Н. В. Чураев и В. М. Муллер, *Поверхностные силы* (Наука, М., 1987).
12. М. Б. Беркинблит и Е. Г. Глаголева, *Электричество в живых организмах* (Наука, М., 2009).
13. N. M. Holbrook, M. J. Burns, and C. B. Field, *Science* **270**, 1193 (1995).
14. W. T. Pockman, J. S. Sperry, and J. W. O'Leary, *Nature* **378**, 715 (1995).
15. Н. И. Редькина и Г. С. Ходаков, Теорет. основы хим. технологии **35** (4), 360 (2001).
16. Г. Г. Комиссаров, *Фотосинтез: физико-химический подход* (УРСС, М., 2003).
17. Г. С. Ходаков, Теорет. основы хим. технол. **51** (1), 111 (2017).
18. С. В. Гудков, В. Е. Иванов, О. Э. Карп и др., *Биофизика* **59** (5), 862 (2014).
19. N. F. Bunkin, N. V. Suyazov, A. V. Shkirin, et al., *J. Exp. Theor. Phys.* **108**, 800 (2009).
20. Н. Ф. Бункин и Ф. В. Бункин, *Успехи физ. наук* **186** (9), 933 (2016).
21. S. V. Gudkov, V. I. Bruskov, M. E. Astashev, et al., *J. Phys. Chem.* **115**, 7693 (2011).
22. В. А. Левтов, С. А. Регирер и Н. Х. Шадрина, *Реология крови* (Медицина, М. 1982).
23. А. А. Мельников и Л. Д. Викулов, *Физиология человека* **29** (2), 48 (2003).
24. К. Каро, Т. Педли, Р. Шротер и У. Сид, *Механика кровообращения* (Мир, М., 1981).
25. R. E. Klabunde, *Cardiovascular Physiology Concepts* (LWW, Philadelphia, 2004).
26. H. Goldsmith and V. Turisto, *Thrombosis and Hemostasis* **55** (3), 415 (1986).
27. М. В. Фок, *Некоторые вопросы биохимической физики* (ФИАН, М., 2003).
28. Н. И. Редькина и Г. С. Ходаков, Теорет. основы хим. технологии **36** (6), 584 (2002).

Nature Minimizes Energy Consumption for the Movement of Water in the Capillary System of Plants and Blood in the Blood Vessels of Animals

G.S. Khodakov

Moscow, Russia

It is obvious that nature has minimized energy consumption for the movement of water in plants and of blood in animals. However, mechanisms for the implementation of this principle have remained unknown until recently. Their scientific substantiation and solution of the problems connected with it became possible based on the recently discovered phenomenon of super-fluidity of water solutions. Plants and animals of the Earth have capillaries and vascular systems that facilitate the transport of fluids necessary for their vital activity. Various inorganic substances can be found in soil water and blood plasma; capillaries of plants and blood vessels of animals are electrically charged. Consequently, there are conditions necessary for the effect of super-fluidity to manifest in them. Super-fluidity is equivalent to a decrease in viscosity of liquid media to values that are several times lower than ordinary ones.

Keywords: porous powder membranes, xylem of trees, capillaries, blood vessels, super-fluidity, hydraulic resistance