

УДК: 621.22.011

А.В. Ратушный, Д.Р. Васильченко, А.А. Дрофа
Сумский Государственный Университет
КОНЦЕПЦИЯ КАПИЛЛЯРНОГО НАСОСА

В статье рассматриваются теоретические основы создания капиллярного насоса на основе анализа физиологических особенностей растений. Раскрываются соответствующие предпосылки использования капиллярности в качестве насосного эффекта. Предлагается многоступенчатая схема насоса, которую можно было бы реализовать методом 3d-прототипирования как единое целое с трубопроводом.

Ключевые слова: капиллярность, насосный эффект, многоступенчатая схема

О.В. Ратушний, Д.Р. Васильченко, А.О. Дрофа
КОНЦЕПЦІЯ КАПІЛЛЯРНОГО НАСОСА

У статті розглядаються теоретичні основи створення капілярного насоса на основі аналізу фізіологічних особливостей рослин. Розкриваються відповідні передумови використання капілярності в якості насосного ефекту. Пропонується багатоступенева схема насоса, яку можна було б реалізувати методом 3d-прототипування як єдине ціле з трубопроводом.

Ключові слова: капілярність, насосний ефект, багатоступенева схема

A. Ratushnyi, D. Vasilchenko, A. Drofa
CONCEPT OF CAPILLARY PUMP

The article reviews theoretical foundations of creating a capillary pump based on an analysis of the corresponding physiological characteristics of plants. The article reveals the relevant preconditions for using capillarity as a pumping effect. The article proposes a multistage pump scheme, which could be realized by 3d-prototyping as a single unit with the pipeline.

Keywords: capillarity, pumping effect, multistage scheme

Вступление. Примерно с 2010 г. в мире происходит интенсивное становление VI технологического уклада, который характеризуется активным развитием нанотехнологий и технологий использования возобновляемых источников энергии. Таким образом, уже сегодня необходимо предполагать кардинальную и неизбежную в будущем трансформацию всех сфер бытия человеческого общества и прежде всего промышленности. Эту трансформацию можно характеризовать массовым отказом от использования технических систем, работающих на принципах, сформулированных в предыдущих технологических укладах и так или иначе потребляющих энергию традиционных невозобновляемых источников в связи с неизбежным исчерпании последних уже в XXI веке [1,2]. На наш взгляд, осознание этого факта требует от нас уже сегодня смелых комплексных междисциплинарных поисков новых концепций и принципов работы для технических систем будущего. Особенно это касается систем, позволяющих транспортировать жидкости (насосов) и, в первую очередь воду, как важнейшего жизненного ресурса человека. Отметим, что для насосов актуальность подобных поисков явно проявляется на основе анализа теории развития технических систем [3].

Постановка проблемы. Исходя из этого, имеем актуальный вопрос, имеющий направленность в будущее: будет ли иметь место потребность в насосах традиционных конструкций, теоретические основы функционирования которых были заложены еще в самых первых технологических укладах (конец XVIII - начало XIX века) при VI и будущих? Концептуально считая ответ на этот вопрос положительным, можем сделать предположение, что перед разработчиками технических систем, передающих энергию жидкости уже сегодня стоит актуальная перспективная проблема поиска новых путей передачи энергии жидкости (а зачастую воде) на микроуровне отдельных частиц. Отметим, что изучение и внедрение принципов, которые эффективно использует сама Природа, полностью соответствует философии нового VI технологического уклада и перехода к технологиям «зеленой» энергетики [4].

Одним из подобных способов является капиллярный эффект, позволяющий древесным растениям поднимать воду из почвы на значительную высоту. Разработка капиллярного насоса в виде системы (пучков) капилляров, которые располагаются в обычном трубопроводе, позволят поднимать и транспортировать воду в фактически «безнасосном» режиме, то есть при отсутствии насосного агрегата традиционной конструкции. Экономически и технологически обоснованная эффективность такой «трубо-капиллярной» системы позволит, на наш взгляд, изготавливать их как одно целое на 3d-принтере.

Цели и задачи исследования. Цель исследования можно сформулировать следующим образом: разработать концепцию создания капиллярного насоса.

Задачи исследования:

- проанализировать физиологические основы использования капиллярного эффекта у растений;

- предложить схему капиллярного насоса, которую можно было бы реализовать методом 3D-прототипирования как единое целое с трубопроводом.

Методология исследования. В качестве методологии данного исследования использовались общенаучные методы – генетический, гипотетико-дедуктивный, индукции, аналогии, научная интерпретация [5].

Изложение основного материала. Рассмотрим подробно эффект поднятия жидкости в тонких трубках (капиллярах), отметим также, что капиллярность, таким образом, сама по сути обладает насосным эффектом. Необходимое условие капиллярного подъема – жидкость должна смачивать материал трубки, т.е. краевой угол должен быть острым ($\Theta < 90^\circ$). При этом условии поверхность жидкости в трубке имеет вогнутую форму, т.е. образуется вогнутый мениск (рис. 1).

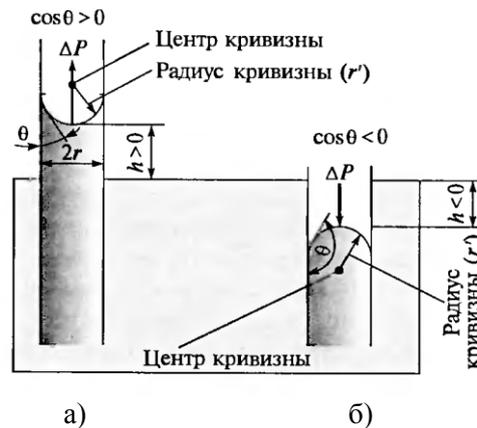


Рис. 1. Иллюстрация эффекта капиллярности для смачиваемой (а) и несмачиваемой (б) поверхности трубок

Давление в вогнутом мениске (p_r) меньше, чем давление p_0 , под плоской поверхностью в широком сосуде на величину капиллярного давления p_c , т.е. перепад давления составляет $\Delta P = p_0 - p_r = + p_c$. Положительная разность давлений в мениске и под плоской поверхностью ($\Delta P > 0$) и является причиной капиллярного подъема смачивающей жидкости.

Для расчета капиллярного давления нужно знать форму мениска, которая определяется поверхностным натяжением жидкости и действием силы тяжести. В достаточно тонких капиллярах, где $d \ll 2a$ (a – капиллярная длина) влияние силы тяжести мало. Поэтому можно считать, что мениск имеет форму сферического сегмента.

Высота капиллярного подъема H обратно пропорциональна диаметру трубки d . То есть чем уже капиллярная трубка, тем больше высота подъема жидкости. Например, вода в стеклянном капилляре диаметром $d = 1$ мм поднимается примерно на 1,5 см; при $d = 1$ мкм высота подъема составляет уже $H = 15$ м.

В целом для одного капилляра

$$H = \frac{4\sigma \cos \Theta}{\rho_{ж} g d} \quad (1)$$

Из уравнения (1) следует, что произведение высоты капиллярного подъема на радиус (полурадиус) трубки представляет для данной жидкости постоянную величину: $Hr = a^2 \cos \Theta$. Отношение

$$a^2 = \frac{2\sigma}{\rho_{ж} g} \quad (2)$$

называют капиллярной постоянной жидкости ($[a^2] = \text{м}^2$), а ее значение зависит только от физических свойств жидкости.

Величину a (м) называют капиллярной длиной. Для воды капиллярная длина составляет $a = 3,85$ мм. Данная величина определяет границу капиллярных явлений, которые играют

существенную роль в области размеров $d \ll 2a$. Напротив, для больших объектов доминирует влияние силы тяжести, поэтому капиллярные явления отступают на второй план.

Важное значение, особенно при рассмотрении возможности использования капиллярности в качестве насосного эффекта, имеют кинетические закономерности капиллярного течения. Рассмотрим самый простой случай – течение смачивающей жидкости по горизонтальному капилляру диаметром d .

Исходя из закона Пуазейля, принимая во внимание, что режим течения жидкости в тонких капиллярах будет ламинарным, скорость течения в горизонтальном капилляре описывается уравнением

$$g = \frac{d\sigma \cos \Theta}{8\mu x} \quad (3)$$

где x – расстояние от начала трубки.

Таким образом, по мере удаления от входа (увеличения расстояния) в капилляре скорость перемещения мениска (расход) убывает [6,7].

Выразив σ через $2a$, используя выражение (2) запишем (3) в виде

$$g = \frac{a^2 d \rho_{ж} g \cos \Theta}{16\mu x} \quad (4)$$

Исходя из того, что $Q = v \cdot S$ и для капилляра круглого поперечного сечения $S = \pi d^2/4$ подача через единичный капилляр будет

$$Q_{1к} = \frac{a^2 d^3 \rho_{ж} g \pi \cos \Theta}{64\mu x} \quad (5)$$

Обозначив $a^2 d^3 \rho_{ж} g \pi = b$ и представив параметр x – расстояние от начала капилляра в качестве его длины l , подставим данные обозначения в (5) и получим выражение для подачи единичного капилляра определенной длины:

$$Q_{1к} = \frac{bd^3 \cos \Theta}{64\mu x} \quad (6)$$

При этом напор единичного капилляра

$$H_{1к} = \frac{2a^2 \cos \Theta}{d} \quad (7)$$

Составим зависимость $H = f(Q)$, выразив из (6) $\cos \Theta$ и подставив его в (7):

$$\cos \Theta = \frac{64Q_{1к} \mu l}{bd^3}; H_{1к} = \frac{2a^2 64Q_{1к} \mu l}{bd^4} = \frac{128Q_{1к} \mu l}{\rho_{ж} g \pi d^4} \quad (8)$$

Перейдем от параметров одиночного капилляра к напору и подаче пучка, содержащего N капилляров: $H = NH_{1к}$, $Q = NQ_{1к}$. Данный пучок длиной l можно рассматривать как ступень капиллярного насоса.

Таким образом (8) можно записать следующим образом:

$$H = N \frac{128Q \mu l}{N \rho_{ж} g \pi d^4} = \frac{128Q \mu l}{\rho_{ж} g \pi d^4} \quad (9)$$

Обозначив $\frac{\mu}{\rho_{ж} g \pi} = c$ – параметр, зависящий только от вида жидкости запишем (9) в виде:

$$H = 128c \frac{Ql}{d^4} \quad (10)$$

Таким образом, видим, что зависимость $H = f(Q)$ – характеристика капиллярного насоса линейна (рис. 2).

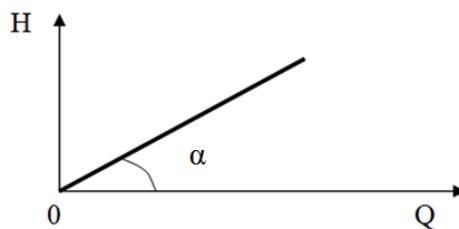


Рис. 2. Характеристика капілярного насоса

При этом угол α будет зависеть от параметров перекачиваемой жидкости и геометрических параметров капилляров. Отметим, что исходя из (10), чем выше подача капиллярного насоса, тем выше его напор. Таким образом, систему капиллярной ступени необходимо создавать максимально приближенной к идеальной форме – пучку трубок круглого поперечного сечения, сделанных из однородного изотропного материала. Это задача уже для химиков и материаловедов.

Анализируя зависимости (5) и (7) относительно максимизации параметров напора и подачи, приходим к выводу, что оптимальной конструкцией многоступенчатого капиллярного насоса будет являться труба, в которую подобно системе дроссельных шайб вставлены диски, представляющие собой пучки капилляров, разнесенные друг от друга на определённую длину (рис. 3). Такие диски, находясь внутри горизонтальных и вертикальных трубопроводов, могут обеспечивать подвод нужного количества воды на необходимое расстояние фактически в «безнасосном» (учитывая, естественно, традиционное понимание этого термина) режиме. В таком контексте можно ставить задачу на более отдаленную перспективу, заключающуюся в освоении производства «моноблочной» системы «труба-капиллярные диски» из композитных материалов и пластмасс.

Заметим, что рассматривая на сегодняшний день уже упоминавшийся как наиболее перспективный уровень оптимизации энергопотребления насосным оборудованием, а именно «насосный агрегат в составе сети», невозможно не уделить внимание самим трубопроводам, технологиям их производства и материалам. Еще в середине 1980-х годов президент АН УССР Б. Е. Патон обращал внимание на значительную материалоёмкость и соответствующие технологические проблемы массового изготовления труб (особенно большого диаметра) из металлов. Академик уже тогда указывал на особую важность повсеместного перехода к производству труб из неметаллических материалов, что обеспечило бы в целом существенный позитивный экономический эффект [8]. Как видим, проблемы чисто насосостроения, при взгляде с более общих системно-структурных иерархических уровней, затрагивают многие отрасли промышленности, что особенно актуально в связи с вызовами, обусловленными переходом к новому технологическому укладу.

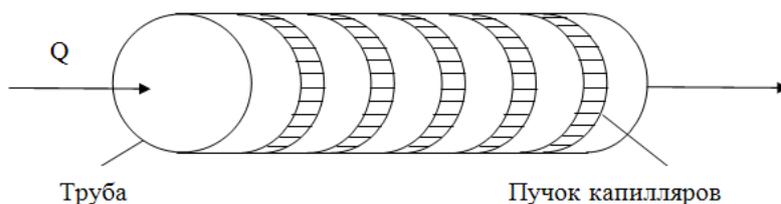


Рис. 3. Концепція конструкції капілярного насоса

В целом можно отметить наличие значительного потенциала «насосного эффекта» явлений капиллярности, осмоса (электроосмоса) и электрокинетики [9] и особенно при их сочетании. Подобный вывод подсказывает нам сама природа на примере жизнедеятельности прежде всего древесных растений, которые благодаря сочетанию эффектов осмоса и капиллярности, поднимают жидкость из почвы на порой весьма значительную высоту. Рассмотрим подробнее с точки зрения понимания насосного эффекта данные особенности жизнедеятельности растений.

Вода в растении формирует непрерывную (неразрывную) водную систему, идущую от почвы к поглощающей поверхности корня и далее через него и стебель (ксилему) к испаряющей поверхности листьев [10]. Данная система может быть представлена как цепь сопротивлений, размещенных последовательно и параллельно (рис. 4).



Рис. 4. Модель установившегося тока воды по растению

По аналогии с законом Ома, поток воды (I_v) в гидравлической цепи представляют как частное от деления суммарной разности водных потенциалов на концах системы ($\Delta\Psi$) и величины общего гидравлического сопротивления растения (R),

$$I_v = \frac{\Delta\Psi}{R} \quad (11)$$

Испарение (транспирация) воды с поверхности листьев определяет направление её движения во всей системе почва-корень-стебель-лист-атмосфера и генерирует соответствующее поглощение воды корнями. Таким образом, транспирация фактически обладает насосным эффектом.

Снижение водного потенциала листьев при транспирации заставляет воду двигаться из ксилемы к испаряющим клеткам листьев. Это в свою очередь снижает давление в ксилеме до значений, меньше атмосферного. Таким образом, вдоль транспирирующего растения устанавливается соответствующий градиент давления. Это, в свою очередь, приводит к усилению поглощения воды корнем из почвы. Отметим, что разность водных потенциалов атмосферы и почвы достаточна для подъёма воды у самых больших деревьев.

В целом, водный потенциал определяется выражением

$$\Psi = \frac{\mu_w - \mu_w^0}{V_w} \quad (12)$$

где \bar{V}_w – парциальный молярный объем воды, м³/моль;

μ_w^0 – стандартный химический потенциал воды, Дж/моль;

μ_w – химический потенциал воды при изменяющемся давлении, Дж/моль.

При этом Ψ выражается в единицах давления.

Величина $\mu_w - \mu_w^0$ определяет способность воды, находящейся при некотором давлении производить работу по сравнению с подобной способностью чистой воды, находящейся при атмосферном давлении.

Известно, что

$$\frac{\mu_w - \mu_w^0}{V_w} = \frac{RT}{V_w} \ln a_w \quad (13)$$

где a_w – активность воды.

При этом

$$a_w = \gamma_w x_w \quad (14)$$

где γ_w – безразмерный коэффициент активности, характеризующий отклонение системы от идеального состояния при наличии в ней растворенных веществ;

x_w – концентрация воды в системе (в мольных долях).

Рассматривая транспорт чисто воды, принимают, что значение γ_w близко к единице.

Вообще химический потенциал воды тем выше, чем больше её активность (концентрация). Растворённые в воде вещества снижают активность воды, так как уменьшают её мольную долю в системе и, соответственно, концентрационную составляющую.

Относительно $\Psi_{атм}$ допускают, что парциальное давление паров воды определяет химическую активность паров воды в воздухе. То есть

$$a_w = \frac{p_{wv}}{p_{wv}^0} = \frac{ОВлВ}{100} \quad (15)$$

где p_{wv} – наблюдаемое парциальное давление паров воды в воздухе;

p_{wv}^0 – давление насыщенных паров, находящихся в равновесии с чистой водой при той же температуре;

$ОВлВ$ – относительная влажность воздуха.

В итоге для водного потенциала атмосферы получим следующее выражение:

$$\Psi_{атм} = \frac{RT}{V_w} \ln \frac{ОВлВ}{100} \quad (16)$$

Отметим, что исходя из того, что объём воды слабо изменяется с изменением давления, можем для неё принять $\bar{V}_w = 18 \text{ см}^3/\text{моль}$.

Условием поглощения воды растением является более высокий водный потенциал почвы, чем водный потенциал корня. Почва это многофазная система, состоящая из четырех главных компонентов:

- твердых минеральных частиц;
- образующих коллоиды сложных органических соединений, получивших название гумуса;
- почвенного раствора;
- смеси газов, близкой по составу воздуху.

Первые две составляющие образуют почвенный скелет и формируют пористую структуру почвы, два других заполняют пустоты, или поры, внутри него.

Величина водного потенциала почвы определяется выражением

$$\Psi_{поч} = P - \pi_{поч} - \tau_{поч}, \quad (17)$$

где P , $\pi_{поч}$, $\tau_{поч}$ – гидростатическое, осмотическое и матричное давление в почве соответственно.

Давление P оказывает заметное влияние на $\Psi_{поч}$ только при глубоком залегании почвенных горизонтов. $\pi_{поч}$ отражает влияние на $\Psi_{поч}$ осмотических сил. Этот компонент водного потенциала определяется, в основном, набуханием коллоидных частиц и в меньшей степени – концентрацией осмотически активных частиц в почвенном растворе. $\tau_{поч}$ отражает влияние поверхностных явлений в капиллярах почвы на границах раздела фаз вода – твердое тело – газ. Отметим, что значение $\Psi_{поч} = 0$ – это максимально возможное значение водного потенциала почвы. Все указанные взаимодействия воды с почвенной структурой приводят к снижению ее водного потенциала, поэтому даже в насыщенной водой почве его величина имеет отрицательное значение.

Таковы основные предпосылки транспорта жидкости в целом по растению. При этом можно отметить, что основной вклад в $\Delta\Psi$, а значит и в I_v стебля, как объективно основной интересующей нас части растения, вносит градиент давления ΔP (Лапласово давление) между жидкой и газовой фазой в капилляре. Осмотическая составляющая при этом не очень велика. Она играет заметную роль в процессе поглощения воды из почвы корнем.

Таким образом, капиллярный насос с учетом опыта изучения основных особенностей транспорта воды в растениях можно представить следующей схемой (рис. 5).

В данном случае объёмный поток воды через капилляр будет определяться выражением $I_v = \frac{\Delta P}{R}$. Сопоставляя данное выражение с приведенным ранее ($I_v = \frac{\Delta\Psi}{R}$)? можно сказать, что

Лапласово давление определяет потенциал стебля. При этом разность потенциалов $\Delta\Psi$ (рис. 1) между атмосферой и стеблем будет представлена выражением

$$\Delta\Psi = \Delta P - \frac{RT}{V_w} \ln \frac{ОВлВ}{100} + \Psi_{поч} \quad (18)$$

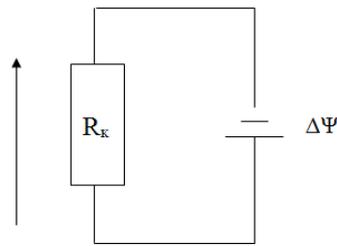


Рис. 5. Схема капиллярной насосной системы

Данная зависимость показывает, что насосный эффект капилляра древесного организма определяется особенностями строения его внутренних проводящих слоёв, параметрами атмосферы и почвы. Соответственно, для правильного и полного понимания особенностей работы описанного выше капиллярного насоса необходимо учитывать структуру и состав перекачиваемой жидкости (водного раствора), а также характеристики внешней атмосферной среды. Можем констатировать, что это объективные требования при рассмотрении насосного эффекта на микроуровне исходя из характеристики грядущего VI технологического уклада. Кроме того представляется интересным и перспективным исследование капиллярного эффекта с точки зрения теории гидравлических цепей.

Выводы. Живая природа неоднократно подсказывала человечеству простые и эффективные способы решения тех или иных технических и технологических проблем. Проблемы и вызовы грядущего столетия фактически не оставляют нам выбора, кроме всестороннего междисциплинарного познания природы и применения этих знаний в конкретных областях техники. Учитывая, сколь значительное место занимает современное насосное оборудование в структуре потребления энергии, какие тенденции к дальнейшему развитию имеет насос как система, исследования принципов передачи энергии на микроуровне, а особенно такие, которые реализуются самой природой, представляются абсолютно верной и своевременной тенденцией [12]. Конкретной реализацией подобных изысканий служит концепция создания капиллярного насоса, изготовление прототипов которого и всестороннее исследование особенностей его работы авторы планируют осуществить в самое ближайшее время.

Список использованных источников:

1. Ратушный, А. В. Путь к новой парадигме развития: особенности перехода к VI технологическому укладу и постиндустриальному обществу / А. В. Ратушный, А. А. Дрофа // Міжвузівський збірник «НАУКОВІ НОТАТКИ» (за галузями знань «Технічні науки») — 2017. № 60 — С. 199-205.
2. Ковальов, І. О. Нетрадиційні та поновлювальні джерела енергії України: навч. посіб. / І. О. Ковальов, О. В. Ратушний. — Суми : СумДУ, 2016. — 201 с.
3. Евтушенко А. А. Законы развития технических систем применительно к насосостроению / А. А. Евтушенко // Тр. 8-й Международ. науч.-техн. конф. "Насосы-96". — Сумы : ВВП "Мрія - 1" ЛТД, 1996. — Т. 1. — С. 68-75.
4. Клочков, В. В. Управление развитием «зеленых» технологий: экономические аспекты: монография / В. В. Клочков, С. В. Ратнер // Ин-т проблем упр-ния им. В.А. Трапезникова Рос. акад. наук. — М.: ИПУ РАН, 2013. — 292 с.
5. Лебедев, С.А. Методология научного познания: монография / С.А. Лебедев. — М.: Проспект. — 2017. — 256 с.
6. Сумм, Б. Д. Основы коллоидной химии : учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / Б. Д. Сумм. — 2-е изд., стер. — М. : Издательский центр «Академия», 2007. — 240 с.
7. Дерягин, Б. В. Поверхностные силы / Б. В. Дерягин, Н. В. Чураев, В. М. Муллер — М.: Наука, 1985, — 398 с.
8. Патон, Б. Е. Наука. Техника. Прогресс / Б. Е. Патон. — М: Наука, 1987. - 415 с.
9. Духин, С. С. Электрофорез / С. С. Духин, Б. В. Дерягин — М: Наука, 1976.
10. Физиология растений / под ред. И. П. Ермакова — М: Академия, 2005.
11. Меренков, А. П. Теория гидравлических цепей / А. П. Меренков, В. Я. Хасилев — Москва : Наука, 1985. — 279 с.
12. Евтушенко, А. А. Развитие теории рабочего процесса, практики конструирования и применения динамических насосов : монография / А. А. Евтушенко. — Сумы : СумГУ, 2013. — 515 с.

Рецензент:

Ковалёв И.А. к.т.н, профессор, заведующий кафедрой Прикладной гидроаэромеханики СумГУ

Стаття надійшла до редакції 20.06.2018