Math-Net.Ru
All Russian mathematical portal

A. Mineev, Плазма и ... немного биологии,
Kvant, 2009, Number 3, 15–18

https://www.mathnet.ru/eng/kvant2631

Use of the all-Russian mathematical portal Math-Net.Ru implies that you have read and agreed to these terms of use
https://www.mathnet.ru/eng/agreement

Download details:
IP: 18.97.14.89
December 13, 2025, 00:26:47

Плазма и... немного биологии

А.МИНЕЕВ

Казалось бы, что общего между физикой плазмы (а именно с ней связала профессиональная деятельность автора статьи – *прим. ред.*) и биологией? Однако, если присмотреться повнимательнее, поражает множество сходных в обеих науках идей и возникающих аналогий.

Плазма

Слово «плазма» часто встречается в нашей жизни. Плазменные панели телевизоров и осветительные приборы – в быту, разряды молнии и полярные сияния – в природе. Излучение Солнца, обеспечивающее нам жизнь, также обязано реакциям, происходящим в плазме. Если взглянуть немного шире, за пределы Земли, то в состоянии плазмы находится более 90% вещества во Вселенной. Там это естественное состояние.

Любое вещество переходит в состояние плазмы, если его нагреть до ионизованного состояния, когда атомы распадаются на составляющие – электроны и ионы. Температура, при которой это происходит, может составлять тысячи градусов – тогда речь идет о низкотемпературной плазме или многие миллионы градусов – в случае высокотемпературной плазмы. Так, характерная температура в центре звезд (типа Солнца) – десятки миллионов градусов, при этом происходит интенсивное протекание реакций синтеза легких ядер.

А вот несколько терминов из биологии, близких плазме по написанию:

- плазма крови (желтоватая полупрозрачная составляющая крови, без эритроцитов, лейкоцитов и тромбоцитов),
- протоплазма (жидкое содержимое живой клетки),
- плазматическая мембрана (клеточная мембрана, окружающая протоплазму),
- плазмодии (это, простите, паразиты, обитающие в эритроцитах млекопитающих).

Как можно видеть, смысл биологических «плазменных» словообразований совсем другой. К тому же и диапазоны температур существования биологических объектов и плазмы совершенно различны. Однако рассмотрим поподробнее ряд более общих аналогий между биологией и физикой плазмы.

Похожие зависимости

При нагревании твердого тела оно претерпевает ряд фазовых переходов: твердое тело → жидкость → газ → плазма, что качественно изображено на рисунке 1.

Рис.1. Характерная зависимость температуры вещества от подводимой энергии (количества теплоты)

Из рисунка следует, что в ходе фазового перехода температура тела остается постоянной (вся подводимая энергия тратится на перевод вещества в новое фазовое состояние), а между фазовыми переходами сохраняется монотонная зависимость температуры от подводимой энергии.

Приведем пример подобной зависимости из физики плазмы. Как известно, материальными стенками (из обычного вещества) длительно удерживать плазму невозможно. За пределами Земли (в звездах) плазма удерживается силами гравитации, а на Земле уменьшить уход энергии горячей плазмы на стенки можно только при использовании магнитного поля. Наибольшие успехи в нагреве и удержании горячей плазмы достигнуты на тороидальных магнитных установках типа ТОКАМАК, идея которых была предложена в начале 1950-х годов И.Е.Таммом и А.Д.Сахаровым. (Более подробно об особенностях таких систем можно прочитать в книге Г.С.Воронова «Штурм термоядерной крепости» – М.: Наука, серия «Библиотечка «Квант», выпуск 37.) В нашей стране были построены и первые токамаки, после впечатляющих результатов на которых установки такого типа стали строить во всем мире. А недавно, в 2006 году, принято решение о сооружении первого международного экспериментального реактора типа токамака – ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) с участием России, Европы, США, Китая, Индии и Южной Кореи.

Казалось бы, с момента появления идеи токамаков прошло уже около 60 лет, а исследования по удержанию и нагреву горячей плазмы продвигаются очень медленно. Однако это впечатление обманчиво. На рисунке 2 приведена эволюция так называемого интегрального параметра токамаков $n\tau_E T$ (здесь n и T – концентрация и температура плазмы, в единицах

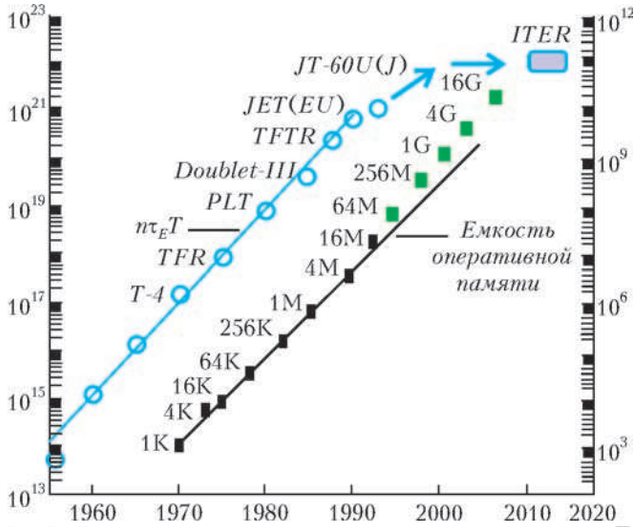

Рис.2. Динамика роста интегрального параметрам $n\tau_E T$ токамаков и оперативной памяти персональных компьютеров

10^{20} м$^{-3}$ и кэВ соответственно, τ_E – энергетическое время удержания плазмы, в секундах), характеризующего близость параметров плазмы к требуемым в реакторе, в сравнении с ростом объема оперативной памяти персональных компьютеров – с одной из самых быстро растущих величин. Из рисунка видно, что скорости роста соответствующих параметров в обоих случаях примерно одинаковы.

А теперь – о зависимости «с изломом» (типа фазового перехода), характерной при описании удержания энергии в токамаках. В тороидальной геометрии токамака из-за неоднородности магнитного поля появляется два сорта заряженных частиц – запертые, их траектория имеет вид банана, и пролетные, их траектория близка к круговой. При небольшой частоте соударений частиц уход энергии из плазмы определяется частицами с бананообразными траекториями, при очень большой – частицами с круговыми траекториями. В результате зависимость коэффициента теплопроводности от частоты соударений имеет вид, изображенный на рисунке 3. Отметим, что время жизни плазмы τ_E определяется через коэффициент теплопроводности χ простым соотношением $\tau_E \sim 1/\chi$.

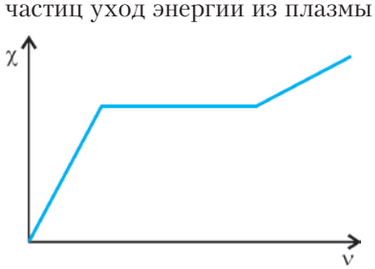

Рис.3. Зависимость коэффициента теплопроводности плазмы от частоты соударений частиц в токамаке

Обратимся к биологии и приведем зависимость относительной высоты дерева от его диаметра из статьи «О высоких деревьях». (См. статью А.Минеева в «Кванте» №3 и 4 за 1992 г.– *Прим.ред.*) График, приведенный на рисунке 4, характеризуется наличием плато, когда максимальное значение отношения h/d при умеренном диаметре дерева примерно постоянно и равно 50, увеличением отношения h/d для невысоких деревьев ($h < 10$ м) и снижением этого отношения для очень высоких деревьев (с диаметром ствола $d > 2 - 2{,}5$ м), так что максимальная высота деревьев на Земле не превышает величины $h_{\max} = 150$ м.

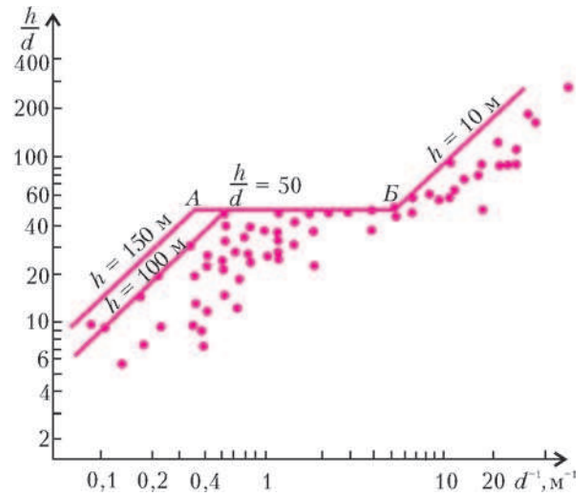

Рис.4. Зависимость относительной высоты дерева от его диаметра

Но ведь это тот же самый вид зависимости, что и на рисунке 3 для плазмы! А что если и в случае деревьев по мере увеличения диаметра ствола (или, что то же самое, по мере уменьшения величины d^{-1}) происходит появление какого-то нового механизма – типа фазового перехода, как на рисунке 1, или нового механизма ухода энергии, как на рисунке 4?

В упомянутой статье подробно исследованы причины такого типа зависимости. Основной вклад дала механика (рис.5): ограничения на прочность дерева при сильном изгибе для тонких деревьев объяснили правую часть зависимости, сильный ветер ответствен за наличие плато, а некоторое уменьшение отношения h/d для очень толстых деревьев объясняется устойчивостью формы ствола дерева под действием собственного веса.

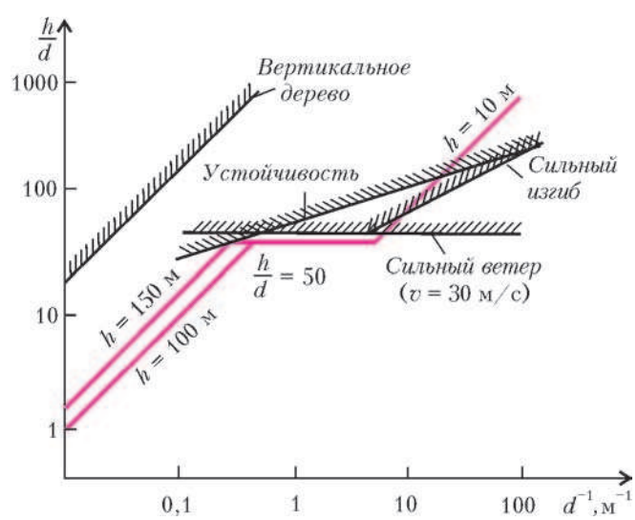

Рис.5. Ограничения, связанные с механическими параметрами дерева

Тем не менее, выяснилось, что природа ограничения высоты дерева ($h_{max} = 150$ м) – вне рамок механики и механической прочности. Анализ площади годовых колец (за десятки лет) привел к выводу о том, что для взрослых деревьев годовые кольца имеют одинаковую площадь. Это означает примерно линейный закон роста массы ствола со временем: $M \sim t$ и (поскольку $h/d \approx \text{const}$) приводит к следующему закону роста высоты дерева:

$$h \sim M^{1/3}, \quad h \sim t^{1/3}.$$

Видно, что рост дерева со временем сильно замедляется, и за время жизни оно просто не успевает дорасти до высоты $h > 150$ м.

Полученные результаты оказались достаточно правдоподобными и в последнее время получили дополнительное подтверждение – как теоретическое, так и экспериментальное. Например, в статье 1999 года из журнала «Nature» (G.B.West, J.H.Brown, B.J.Enquist, «A general model for the structure and allometry of plant vascular systems») развита модель, согласно которой зависимость высоты дерева от массы его ствола оказывается еще более медленной:

$$h \sim M^{1/4},$$

и дерево действительно просто не успевает вырасти слишком высоким.

В еще одной статье, теперь уже 2004 года, из журнала «Nature» (G.W.Koch, S.C.Sillett, G.M.Jennings, S.D.Davis, «The limits to tree height») приведены результаты очень изящных измерений характеристик кроны наиболее высоких секвой в северной Калифорнии (для этого пришлось научиться брать пробы с высоты более 100 м). Измерения показали, что по мере увеличения высоты дерева уменьшаются длина хвоинок и угол их наклона к ветке (рис.6), в итоге жизнь

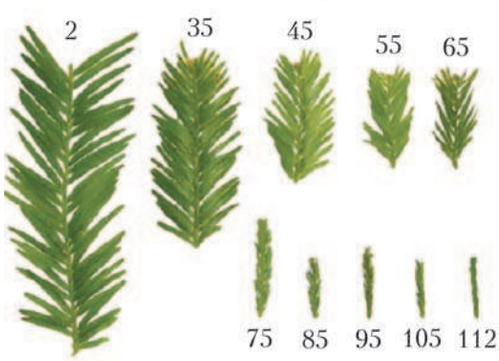

Рис.6. Изменение размеров и структуры хвои в зависимости от высоты секвойи (цифры – высота дерева в метрах)

на большой высоте как бы замирает. Полученные экспериментальные зависимости приводят к предельной высоте деревьев $h_{max} \le 130$ м.

Ограничения на потребление и высвобождение энергии

В статье «Фауна и Флора» (см. статью А.Минеева в «Кванте» №4 за 2001 г. – *Прим.ред.*) проанализированы ограничения, связанные со скоростью потерь тепла животными, и показано, что постоянство температуры тела приводит к ограничениям на их массу: сверху порядка 100–200 тонн (при большей массе организм перегревается при движении) и снизу порядка нескольких грамм (при меньшей массе тепло не удержать, организм очень быстро охлаждается, приходится все время «грызть пищу»). Условие постоянства температуры можно записать в виде равенства

$$P = \frac{W}{\tau},$$

где P – мощность, вырабатываемая в организме, W – отводимая тепловая энергия, τ – время потерь тепла.

Такое же уравнение энергобаланса «работает» и в плазме, для которой P – мощность, выделяющаяся в результате реакций синтеза в плазме, W – тепловые потери энергии плазмы, τ – энергетическое время жизни плазмы. Имеющиеся экстраполяции времени жизни приводят к наличию минимального размера плазмы в реакторе (если размеры будут еще меньше, то условие энергобаланса не будет выполнено). Для систем с магнитным удержанием это метры – так, в реакторе ITER малый радиус тора составляет 2 м, а объем плазмы около 1000 м^3.

Ограничения на размеры снизу

Наименьшая структурная единица, из которой построены живые организмы, это клетка. Она имеет характерный размер около 10 микрон. (Аргументы, приводящие к такому значению диаметра клеток, приведены, в частности, в статье А.Минеева «От мыши до слона» в «Кванте» №11/12 за 1993 г. – *Прим. ред.*)

Ограничение снизу на размеры имеется и у плазмы. Плазма, с одной стороны, представляет собой газ *заряженных* частиц, а с другой (на макроскопических расстояниях), она должна быть в целом *нейтральной*. Это противоречие снимается тем, что заряд на больших расстояниях экранируется из-за присутствия расположенных рядом других заряженных частиц. В результате потенциал заряженной частицы вместо обычного кулоновского $\varphi = \frac{q}{r}$ в плазме приобретает вид

$$\varphi = \frac{q}{r} \cdot e^{-\frac{r}{\lambda_D}},$$

т.е. он остается кулоновским на малых расстояниях r и эффективно экранируется на масштабах, превышающих так называемый дебаевский радиус λ_D. (Заметим, что формулы для потенциала записаны в гауссовой системе единиц, активно используемой физиками. – *Прим. ред.*) По мере увеличения концентрации заряженных частиц плазмы дебаевский радиус уменьшается (заряженные частицы ближе, экранирование лучше). В общем случае его можно выразить через концентрацию n и температуру T плазмы следующим образом:

$$\lambda_D \approx 2,4 \cdot 10^{-5} \cdot \sqrt{\frac{T}{n}},$$

где размерность дебаевского радиуса $[\lambda_D] =$ м, температуры $[T] =$ кэВ, а концентрация n измеряется в

единицах 10^{20} м$^{-3}$. Как правило, дебаевский радиус довольно мал (так, для плазмы реактора ITER с T = = 10 кэВ и $n = 10^{20}$ м$^{-3}$ величина λ_D составляет около 100 микрон) и существенно меньше размера самой плазменной области.

Ограничения на предельные возможности теплоотвода

В живых организмах, обитающих на Земле, уровень интенсивности циркулирующих тепловых потоков задается Солнцем. От Солнца до поверхности Земли доходит тепловой поток порядка 1 кВт/м^2, из которых поглощается около 300 Вт/м^2.

В случае высоких деревьев этот поток тепла запускает главный механизм подъема воды по стволу дерева наверх (при испарении воды через устьица). При этом оказывается, что, хотя площадь, занимаемая устьицами, составляет всего около 1% площади листа, испарение через них происходит примерно с той же скоростью, как и с открытой поверхности. (О природе этого парадокса рассказано в статье А.Минеева «Листья улыбаются» в «Кванте» №4 за 2006 г. – *Прим. ред.*)

Величина удельного теплового потока, отводимого через кожу животных при испарении, в целом того же порядка. Так, для человека в спокойном состоянии она составляет примерно 50 Вт/м^2. При максимальных физических нагрузках, например, рекордсмена-спринтера отношение выделяемой при беге тепловой мощности к площади поверхности тела бегуна может достичь 2 кВт/м^2. Такую величину теплового потока человеческое тело уже не успевает отвести (через кожу отводится до 1 кВт/м^2), и в ходе бега температура тела такого рекордсмена-спринтера должна расти.

А каких величин могут достигать тепловые потоки в плазменных устройствах? В энергетическом реакторе плазму нужно догреть до температуры порядка 100 млн градусов с помощью ввода извне определенной мощности нагрева через специальные окна ввода. Достигнутые удельные тепловые потоки составляют при этом 10 – 50 МВт/м^2 (в виде пучков частиц или электромагнитных волн). Основная часть энергии синтеза приходится на нейтроны (например, в реакции $D^+ + T^+ \to He^{++} + n$ нейтрон уносит энергию ~ 14 МэВ), для них удельный тепловой поток на окружающие плазму стенки составляет 1 – 3 МВт/м^2.

Следует отметить, что параллельно с термоядерной установкой в реакторе ITER будет создаваться специальный стенд для испытания материалов под действием термоядерных нейтронов. Этот стенд представляет собой большой ускоритель, пучок дейтронов из которого попадает на литиевую мишень. В мишени по реакции $D + {}^6Li \to {}^8Be + n$ образуются нейтроны со спектром, близким к термоядерному. Для того чтобы достичь требуемой для испытания материалов нейтронной нагрузки порядка 1 – 2 МВт/м^2, нужно, чтобы поток тепла от атомов дейтерия на литиевую мишень достигал 1000 МВт/м^2! Такие величины удельных тепловых потоков можно отвести только при использовании струи жидкого лития, движущейся по транспортеру специальной конструкции с большой скоростью (~ 20 м/с).

НАШИ ИНТЕРВЬЮ

Интервью с А.Б.Сосинским

Алексей Брониславович Сосинский – известный математик, автор научных и научно-популярных книг и статей, среди которых монография (совместная с В.В.Прасоловым) «Узлы, зацепления, косы и трехмерные многообразия», научно-популярная книга (переведенная на 6 языков) «Узлы. Хронология одной математической теории». Много лет Алексей Брониславович был редактором отдела математики «Кванта». Он – один из постоянных авторов нашего журнала, выдающийся лектор и преподаватель. На сайте mathnet.ru можно посмотреть его фильм-лекцию «Теорема Гёделя». Советуем вам также познакомиться с докладом «Математика жонглирования», прочитанным Жаном-Кристофом Новелли и Флораном Ивером, в котором А.Б.Сосинский выступил в роли переводчика (см. сайт mccme.ru). Это не случайно: Алексей Брониславович с детства говорит по-французски и по-английски. Многие российские математики учились писать научные статьи на английском языке по книге А.Б.Сосинского «Как написать математическую статью по-английски».

Алексей Брониславович – человек интересной судьбы, и мы рады представить нашим читателям его рассказ о себе, о математиках и математике.

– Может быть, вы расскажете сначала о вашей семье, кто ваши родители…

– Совсем коротко о моей родословной. Отец – из безземельных дворян (его отец, мой дед, был очень известным железнодорожным инженером), воевал против большевиков, после окончания гражданской войны эмигрировал и на долгие годы осел в Париже. Там он познакомился с моей мамой, Ариадной Черновой, дочкой Виктора Михайловича Чернова, лидера и главного теоретика партии социалистов-революционеров, председателя Учредительного Собрания до его разгона большевиками. О жизни родителей и о моем детстве рассказывать читателям «Кванта», я думаю, нет смысла.

Давайте я начну сразу с того момента, когда я оказался на мехмате МГУ. Я был принят на мехмат в девятнадцатилетнем возрасте сразу на второй курс. До этого я жил и учился за границей. Родился я во Франции, а уже первую университетскую степень получил в Штатах в 1957 году – степень бакалавра Нью-Йоркского университета. Тогда же мне было предложено поступить в аспирантуру Математического института Куранта, но я отказался, понимая, что в тот момент, т.е. в середине 50-х годов, Москва (и в частности, Московский государственный университет) являлась одним из ведущих – если не самым сильным – математическим центром в мире.

– А сейчас это так?

– К сожалению, нет. Все знают, что большое количество очень сильных российских математиков уехали за границу. Можно сказать, что почти все звездные российские математики либо