

Биомеханика - наука о движении в живой природе

Андрей Кимович Цатурян

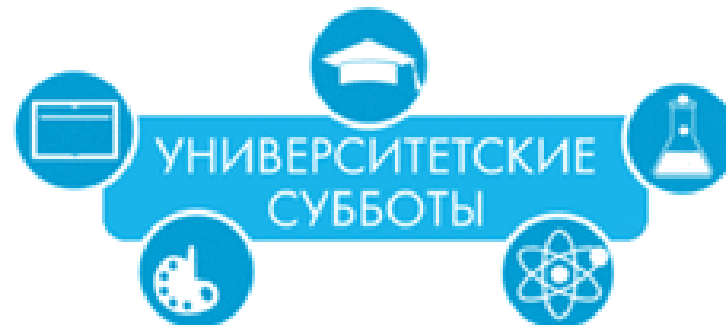
tsat@imec.msu.ru



Лаборатория биомеханики, Институт механики МГУ



ДЕПАРТАМЕНТ
ОБРАЗОВАНИЯ
ГОРОДА МОСКВЫ



«Биомеханика

- область естественных наук, которая на основе идей и методов современной механики изучает свойства биологических объектов и протекающие в них процессы на всех уровнях организации - от молекул до сообществ живых организмов в различных состояниях (норма и патология, развитие и старение и.т.д.)
- применение результатов таких исследований в механике, биологии, медицине, промышленности и спорте
- ученую степень по биомеханике можно получить по физико-математическим, техническим, биологическим, медицинским и ... педагогическим наукам»

© паспорт научной специальности по версии ВАК

Биомеханика

- биология, которой занимаются механики – слишком узко
- исследование движения живых объектов – слишком широко

Современная биомеханика возникла на рубеже 19-20 века

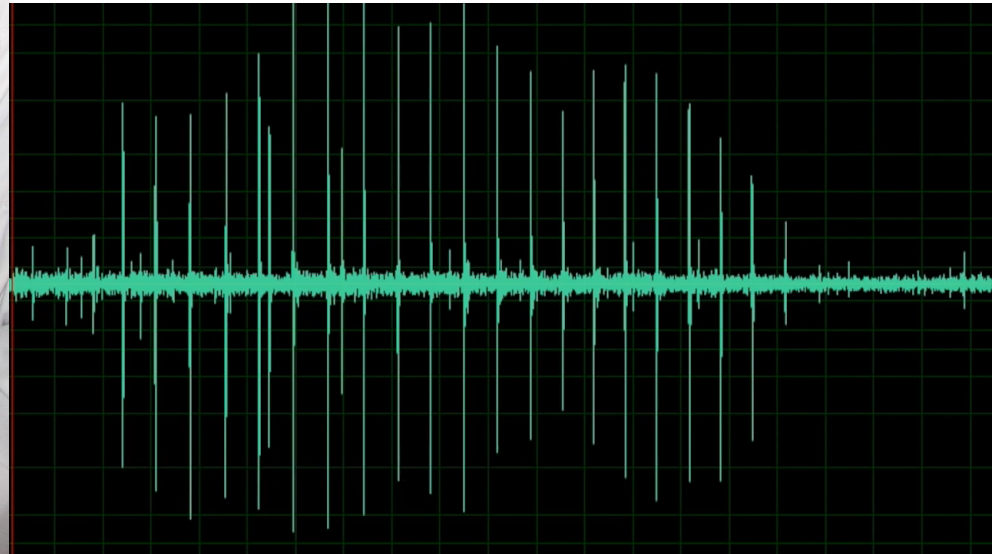
Великие предшественники

- Леонардо да Винчи (1452-1519)
- Галилео Галилей (1564-1642)
- Уильям Гарвей (1578-1657)
- Рене Декарт (1596-1650)
- Антони ван Левенгук (1632-1723)
- Роберт Гук (1635-1703) и Исаак Ньютон (1643-1727)
- Леонард Эйлер (1707-1783) – проф. физиологии в Петербурге с 1727 г.
- Даниил Бернулли (1700-1782)
- Луиджи Гальвани (1737-1798) и Алессандро Вольты (1745-1827)
- Антуан Лавуазье (1743-1794), Томас Юнг (1773-1829),
Жан Мари Пуазейль (1799-1869), Герман Гельмгольц (1821-1894) – врачи
- Роберт Браун (1773-1856), Адольф Фик (1829-1901) - биологи

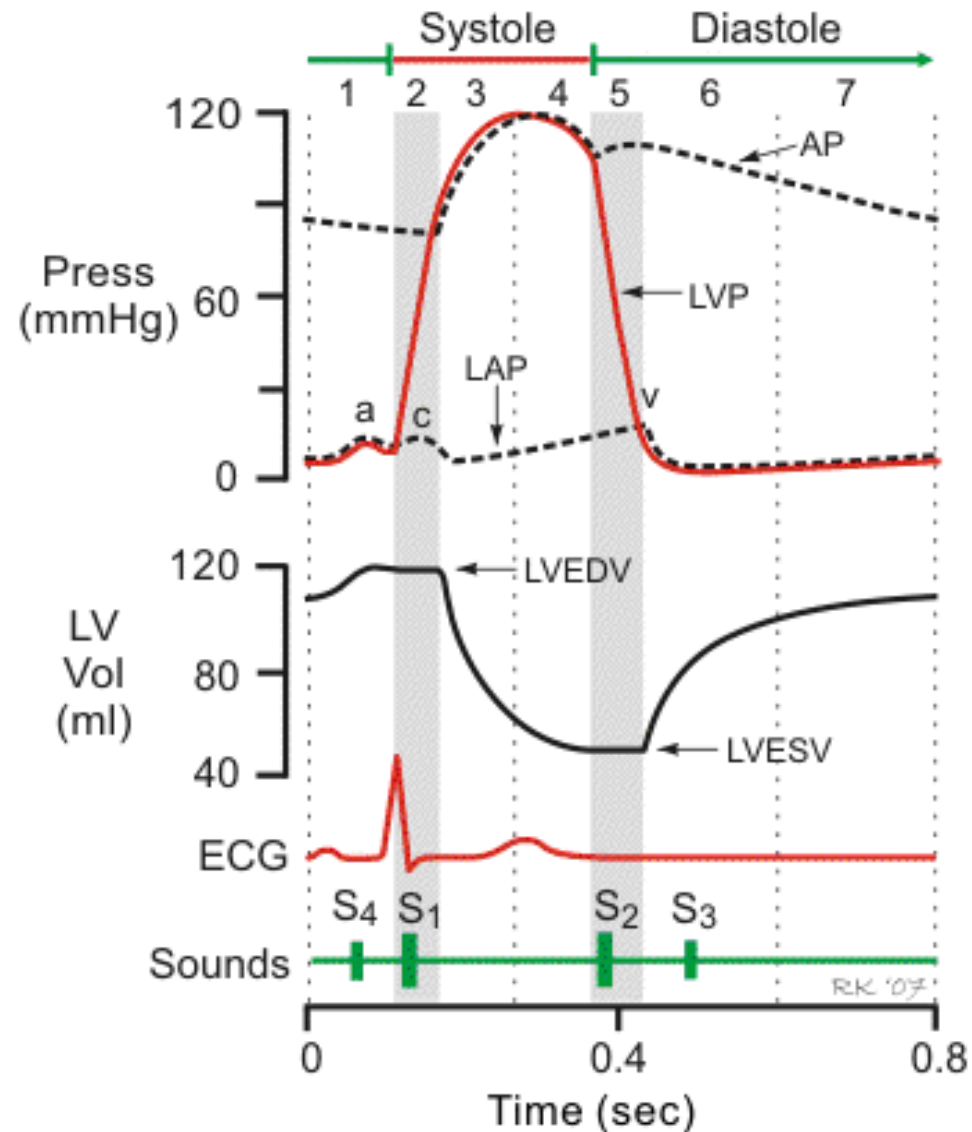
ПЛАН

- Звуки Короткова: что слушает врач, когда измеряет артериальное давление
- Полет насекомых или «тяжелый» воздух
- Движение в микромире - ползущие в сиропе
- Вода поднимается в небо

Механика измерения артериального давления крови методом Н.И. Короткова



Давление крови в полостях сердца и в крупных артериях

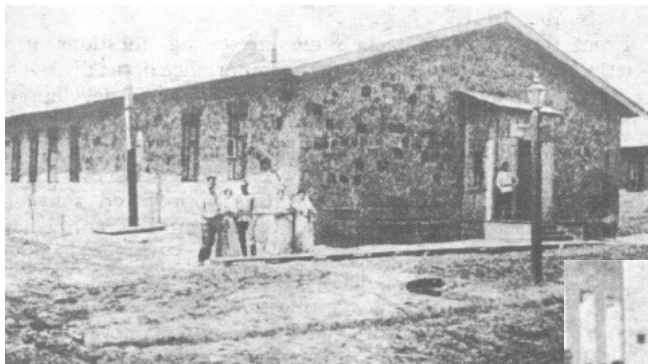


- Николай Сергеевич Коротков
- Метод Короткова – звуковое измерение артериального давления крови
- Основные опытные факты
- Пульсовая волна
- Теория метода Короткова
- Объяснение опытных фактов

Николай Сергеевич Коротков



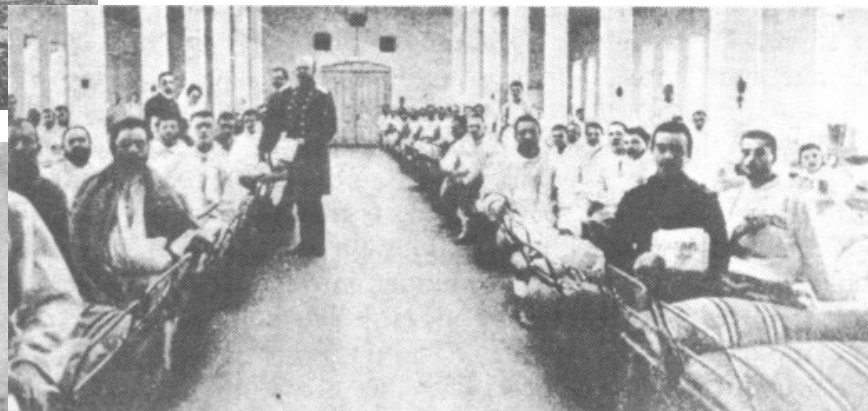
- 1874: родился 13 (25) февраля в Курске в семье купца;
- 1893: окончил гимназию и поступил на медицинский факультет Краковского университета;
- 1895: перевелся в Московский университет;
- 1898: с отличием окончил медицинский факультет Московского университета;
- 1900: врач интерн – волонтер клиники Московского университета;
- 1900-1901: врач Красного Креста во время Боксерского восстания в Китае;
- 1903-1904: ассистент хирургической клиники Военно-медицинской академии в Петербурге;
- 1904-1905: врач военно-полевого госпиталя в Харбине;
- 1904: женился на медсестре Елене (умерла во время Ленинградской блокады в 1941 г.);
- 1905: рождение сына Сергея (стал врачом, умер в 1977 г.);



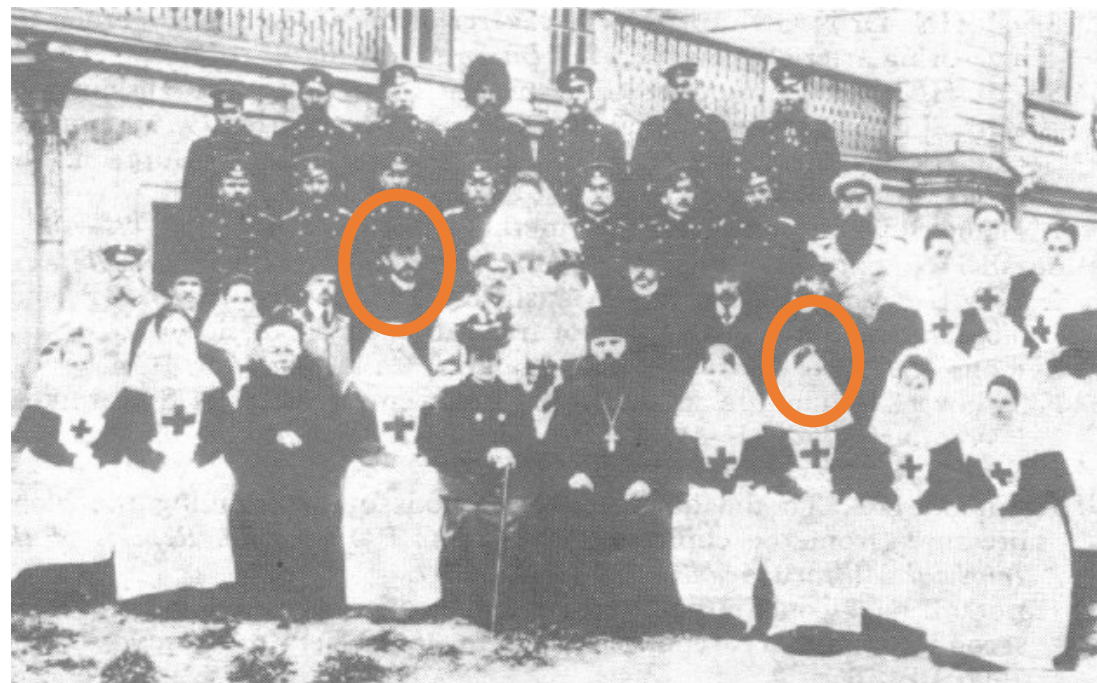
Госпиталь Красного Креста в Харбине 1904 г.



Н.С. Коротков



Елена Короткова



Николай Сергеевич Коротков



- 1905, 13 ноября: первое сообщение о звуковом методе определения артериального давления крови

Др. Н. С. Коротков. К вопросу о методах исследования кровяного давления (из клиники проф. С. П. Федорова).

На основании своих наблюдений докладчик пришел к тому заключению, что вполне сжатая артерия при нормальных условиях не дает никаких звуков. Воспользовавшись этим явлением, он предлагает звуковой метод определения кровяного давления на людях. Рукав Riva-Rocci накладывается на среднюю часть плеча; давление в рукав быстро повышается до полного прекращения кровообращения ниже рукава. Затем, предоставляя ртути манометра падать, детским стетоскопом выслушивают артерию тотчас ниже рукава. Сперва не слышно никаких звуков. При падении ртути манометра до известной высоты появляются первые короткие тоны, появление которых указывает на прохождение части пульсовой волны под рукавом. Следом, цифры манометра, при которых появился первый тон, соответствуют максимальному давлению. При дальнейшем падении ртути в манометр слышатся систолические компрессионные шумы, которые переходят снова в тоны (вторые). Наконец, все звуки исчезают. Время исчезновения звуков указывает на свободную проходимость пульсовой волны; другими словами, в момент исчезновения звуков минимальное кровяное давление в артериях превышает давление в рукав. След. цифры манометра в это время соответствуют минимальному кровяному давлению. Опыты на животных дали положительные результаты. Первые звуки тоны появляются (на 10—12 тона) раньше, нежели пульс, для ощущения которого (в а. в. radialis) требуется прорыв большей части пульсовой волны.

Прим. доц. А. Н. Меньков. Как Вы объясните происхождение звуков ниже рукава в начале и в конце выслушивания?

Докладчик. В данном случае давление в рукав близко к минимальному давлению в артериях, но в рукав оно все же больше; при проскальзывании кривой волны оседают различается и слышится короткий тон.

Прим. доц. А. Н. Иванов. Какую Вы наблюдали разницу между максимальным и минимальным давлением в плечевой артерии?

Докладчик. Цифры у меня получались чрезвычайно разными, но в норме между 25—35 мм. и больше.

В. Г. Болжонский. Насколько я понял из вашего весьма интересного доклада, происхождение звуковых явлений (звуков, шумов) при нашем весьма простом опыте вы объясните

Др. Н.С. Коротков.

К вопросу о методах исследования кровяного давления (из клиники С.П. Федорова).

На основании своих наблюдений докладчик пришел к тому заключению, что вполне сжатая артерия при нормальных условиях не издает никаких звуков. Воспользовавшись этим явлением, он предлагает звуковой метод определения кровяного давления на людях. Рукав Riva-Rocci накладывается на среднюю часть плеча, давление в рукаве быстро повышается до полного прекращения кровообращения ниже рукава. Затем, предоставив ртути падать, детским стетоскопом выслушивают артерию тотчас

ИЗВѢСТІЯ

ИМПЕРАТОРСКОЙ

ВОЕННО-МЕДИЦИНСКОЙ АКАДЕМІИ

1905

Декабрь. № 4.

Томъ XI

С-ПЕТЕРБУРГЪ.

Типографія М. Магницкаго, Пискаревск. шоссе, домъ 24 В.

1906

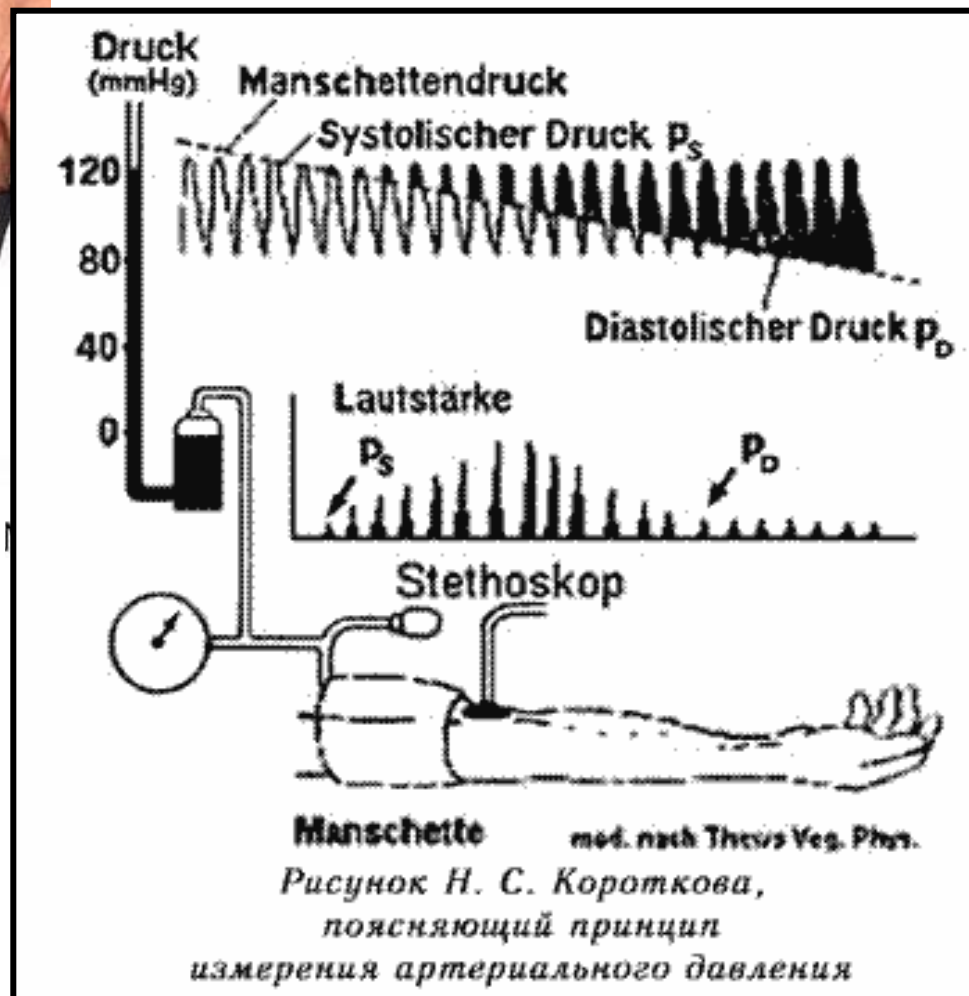
ниже рукава. Сперва не слышно никаких звуков. При падении ртути до известной величины появляются первые короткие тоны, появление которых указывает на прохождение части пульсовой волны под рукавом. Следов. цифры манометра при которых появляются первые тоны, соответствуют максимальному давлению. При дальнейшем падении ртути слышатся систолические компрессионные шумы, которые снова переходят в тоны. Наконец, все тоны исчезают. Время исчезновения звуков указывает на свободную проходимость пульсовой волны; другими словами в момент исчезания звуков минимальное кровяное давление в артерии превысило давление в рукаве. След. цифры давления в этот момент соответствуют минимальному кровяному давлению. Опыты на животных дали положительные результаты. Первые звуки – тоны определяются (на 10-12 мм рт.) раньше, нежели пульс, для ощущения которого (в *a. radialis*) требуется прорыв большей части пульсовой волны.

Николай Сергеевич Коротков



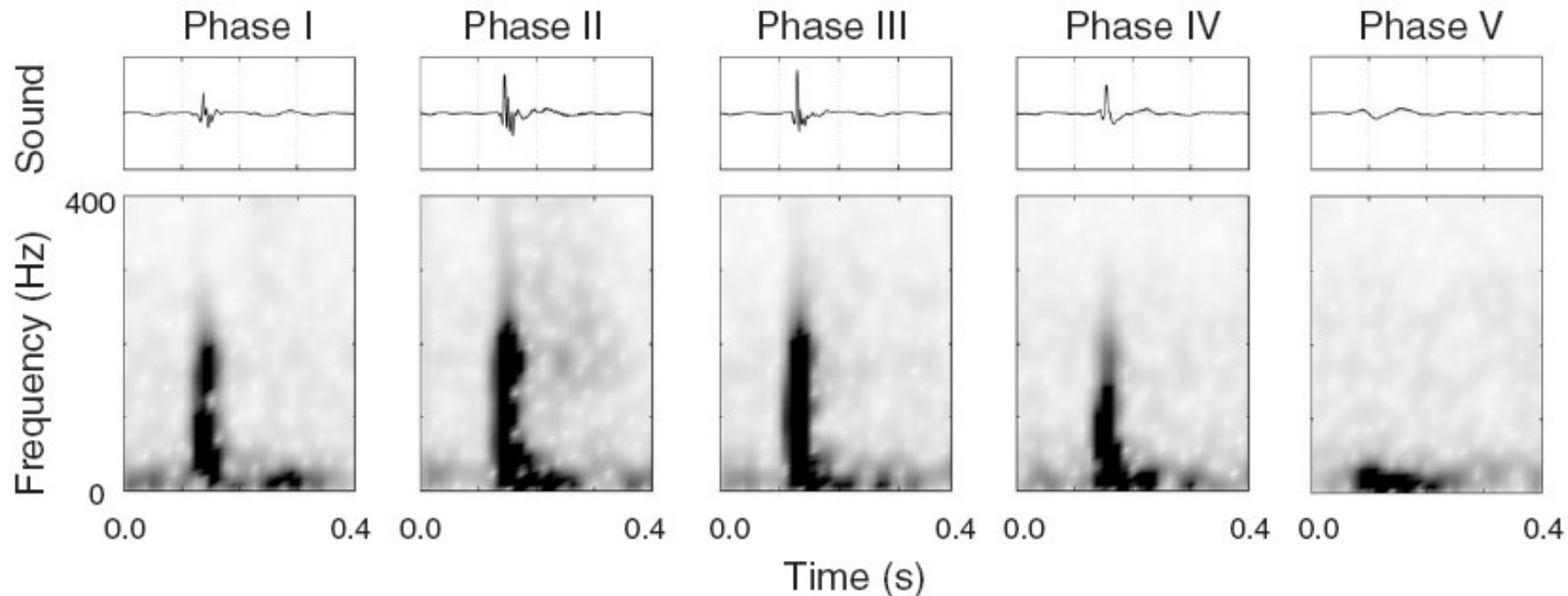
- 1905-1907: чахотка, живет без работы в Курске;
- 1906: вторая публикация – доказательство артериального происхождения звуков Короткова (доклад на научном обществе 13 декабря 1905);
- 1907-1910, 1911-1913: врач на золотых приисках на р. Лене;
- 1910: защита диссертации;
- 1910: участвует в борьбе с эпидемией холеры на Кавказе;
- 1912: Ленский расстрел (более 150 убитых, более 100 раненых);
- 1913: старший врач клинической больницы в Санкт-Петербурге;
- 1914-1917: старший врач госпиталя «Благотворительный дом для раненых солдат» в Царском Селе;
- 1917-1920: главный врач Мечниковской больницы в Петрограде;
- 1920, 14 марта: умер от легочного кровотечения.

Метод Короткова (1905)



Звуки Короткова – основные опытные факты

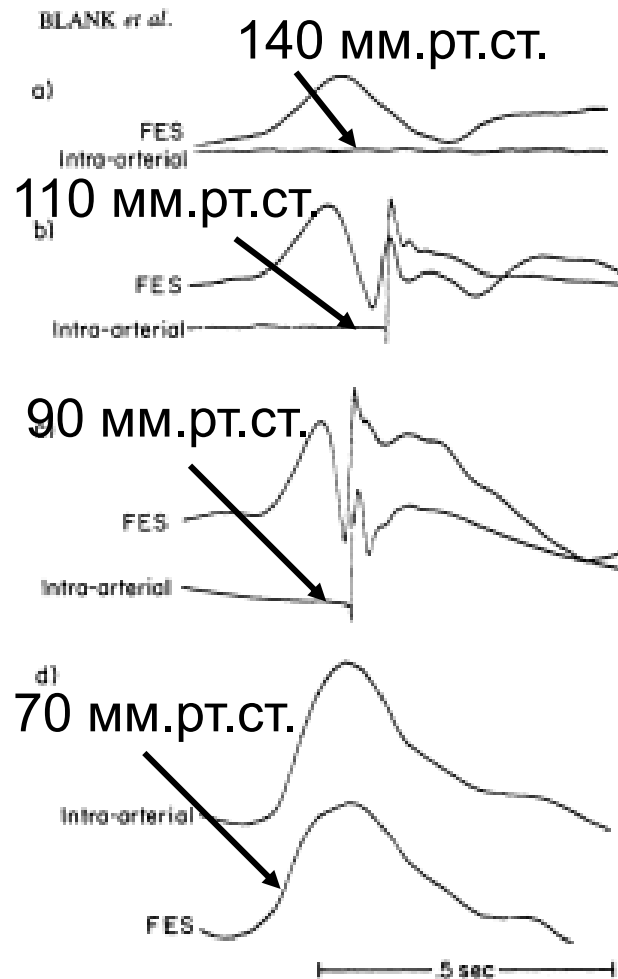
- возникают в систолической фазе сердечного цикла
(Н.С. Коротков, 1905; ...)
- фазы звуков (Коротков, 1905; Ettinger, 1907)
тоны (3-5 колебаний, 100-300 Гц);
шумы (фаза 2, “мур-мур”, 20-500 Гц, длительность до 0.15 сек.)



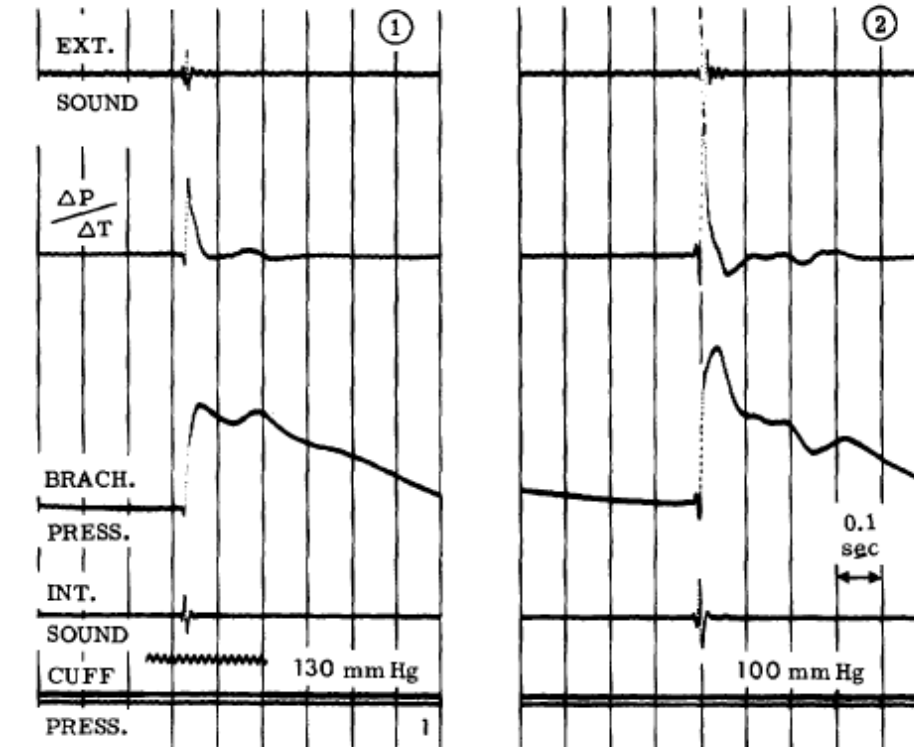
(Allen et al., *Physiol. Measur.* 2004)

Звуки Короткова – основные опытные факты

- сопровождаются увеличением крутизны фазы нарастания пульсовой волны давления и появлением пре-анакротического провала давления (Erlanger, 1921)



(Blank et al., *Circulat.*, 1988)



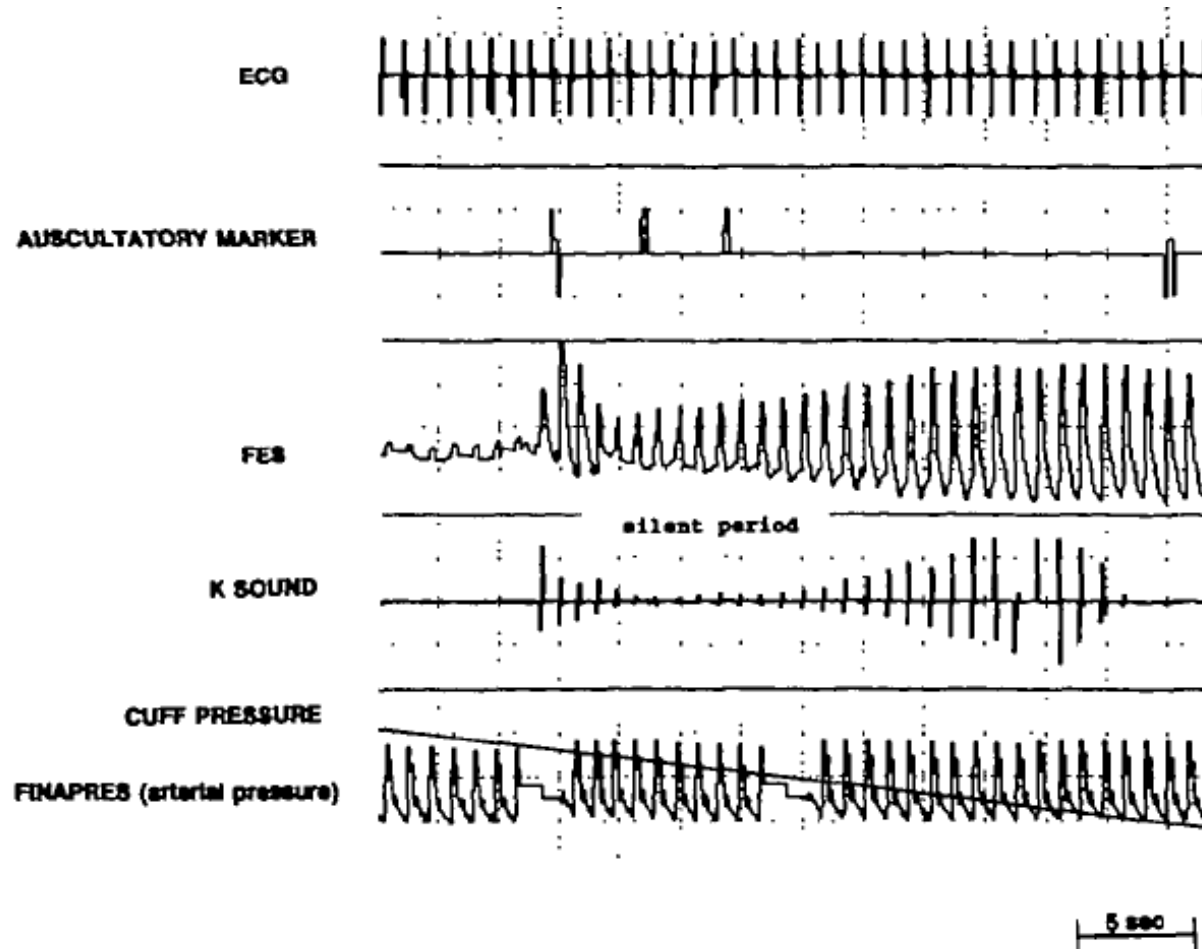
(Tavel et al., *Circulat.*, 1969)

Звуки Короткова – основные опытные факты

- источник тонов – пережатый участок артерии, амплитуда максимальна у нижнего (дистального) края манжеты (Tavel et al., 1969);
- чем короче манжета, тем тише звуки и больше ошибка (Г.И. Косицкий, 1959);
- напряжение мышц плеча повышает частоту тонов и снижает их длительность (Григорян, Саакян, 1978);
- при замене манжеты жестким штампом звуки исчезают (Косицкий, 1959);
- пережатие артерии ниже манжеты приводит к снижению громкости тонов (Rodbard, 1953, ...)

Звуки Короткова – аномалии

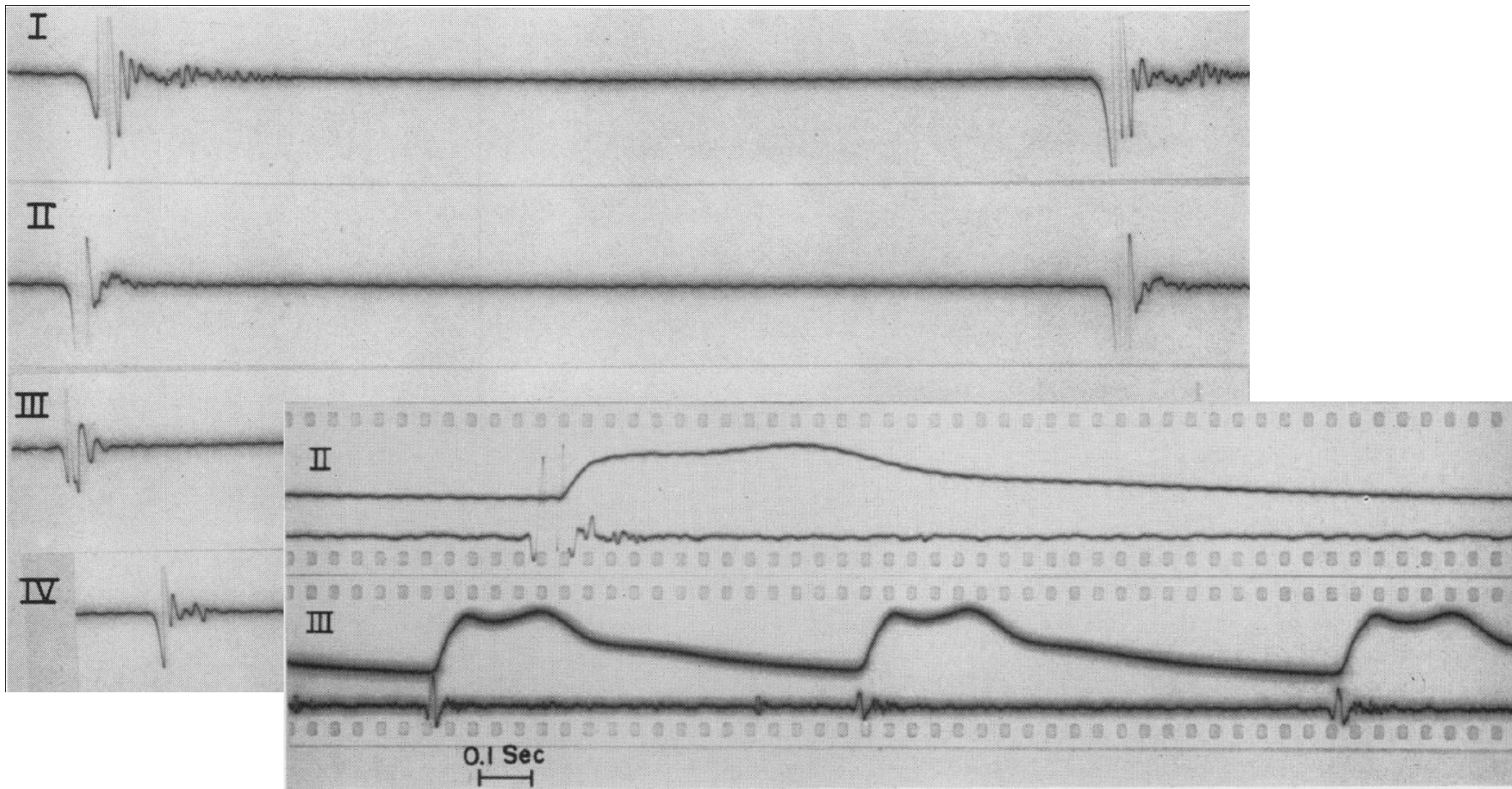
- «аускультаторный провал» (Крылов, *Изв. С.-П. Импер. воен.-мед. акад.*, 1906, ...);



(Blank *et al.*, *Hypertension*, 1991)

Звуки Короткова – аномалии

- «бесконечный тон Короткова», «нулевое» диастолическое давление или “pistol-shot” (Войтинский, 1933, ...);



Каково происхождение
звуков Короткова?

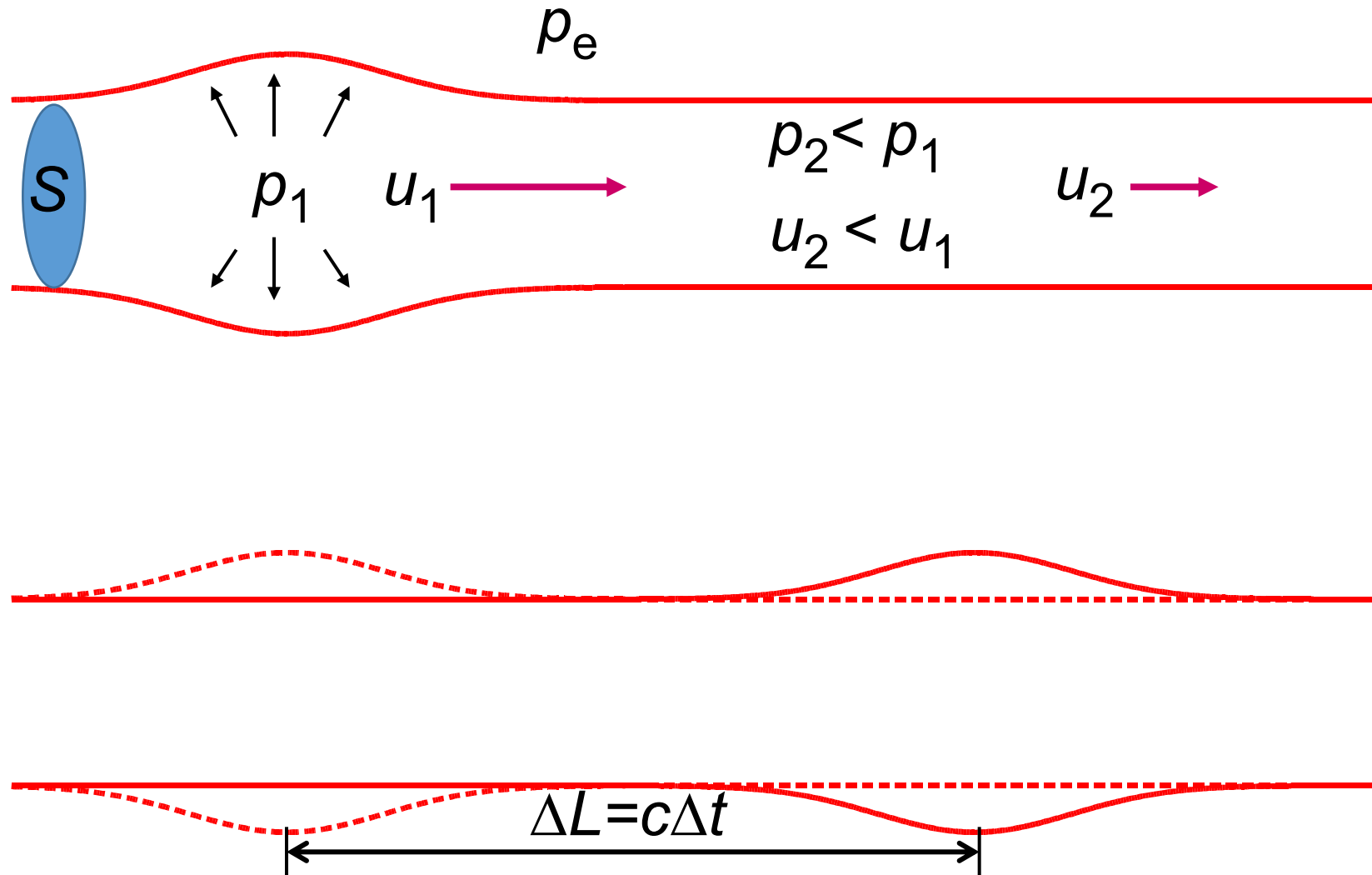
Происхождение звуков Короткова – теории

- «при проскальзывании **пульсовой волны** сосуд разлипается и дает короткий хлюпающий тон» (Н.С. Коротков, 1905);
- «опрокидывание» **пульсовой волны**, образование «ударной волны» (Bramwell, A.V. Hill, 1923 ...)
- флаттер, кавитация, влияние гладких мышц артерии, турбулентность, автоколебания и т.д.

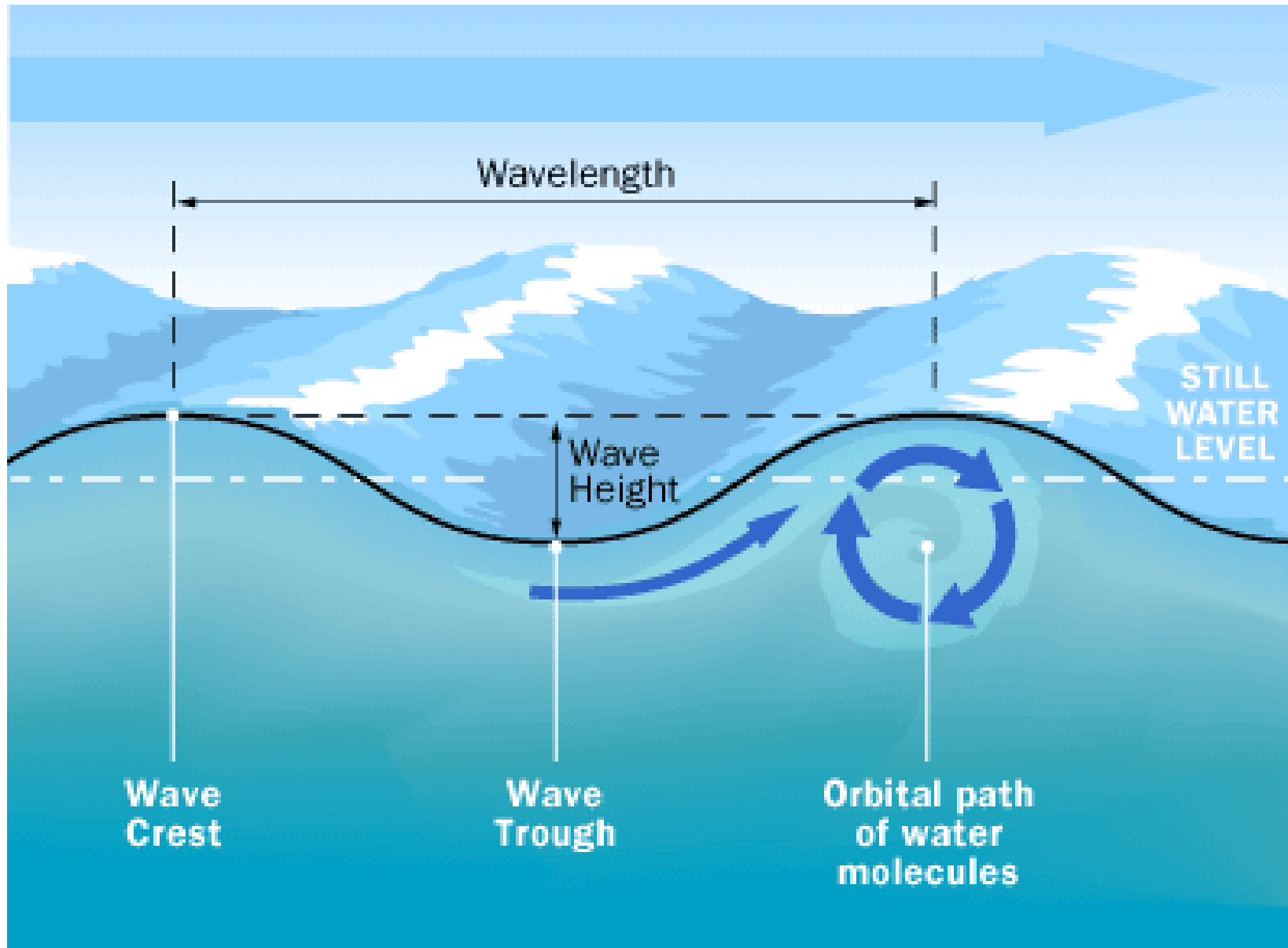
Происхождение звуков Короткова – теории

- «при проскальзывании **пульсовой волны** сосуд разлипается и дает короткий хлюпающий тон» (Н.С. Коротков, 1905);
- «опрокидывание» **пульсовой волны**, образование «ударной волны» (Bramwell, A.V. Hill, 1923 ...)
- флаттер, кавитация, влияние гладких мышц артерии, турбулентность, автоколебания и т.д.

Пульсовая волна: физика



Пульсовая волна похожа на волны на воде



А.В. Хилл (A.V. Hill, 1886-1977)

член Королевского общества с 1918 г.,
Нобелевская премия по физиологии и медицине 1923 г. за
исследования мышц

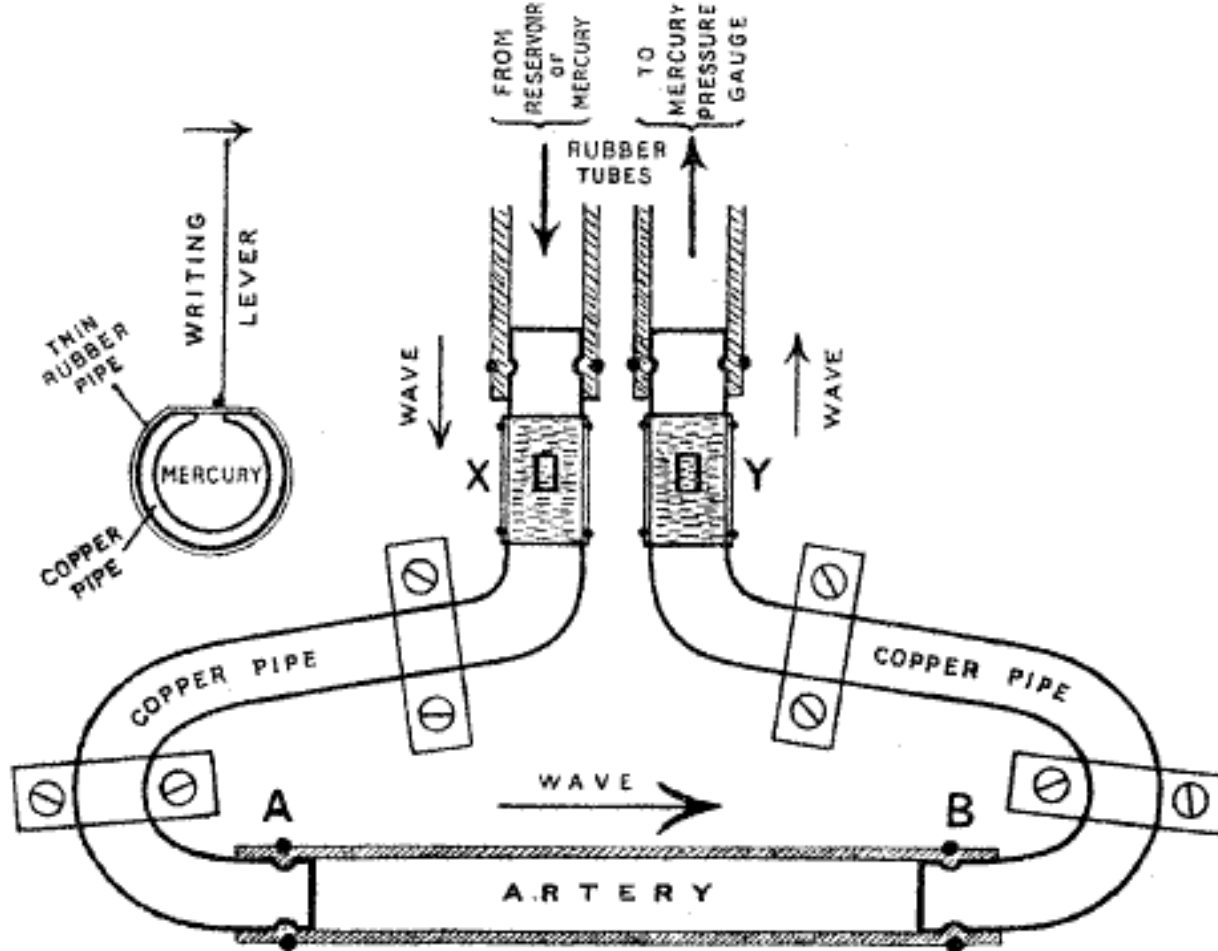


FIG. 1.

(Bramwell, Hill, 1922)

Скорость пульсовой волны в отрезке артерии

The following Table shows the results of a series of observations on the artery. The values for blood are obtained by multiplying by 3·58.

Pressure (mm.)	25	57	78	92	110	152	200
Interval observed (secs.) ...	0·079	0·086	0·0665	0·052	0·0465	0·0380	0·0338
Zero error (secs.)	0·014	0·015	0·0156	0·016	0·0170	0·0187	0·0206
Difference (secs.)	0·065	0·071	0·0509	0·036	0·0295	0·0193	0·0132
Velocity (metres p.s.)	1·05	0·96	1·34	1·90	2·32	3·55	5·18
Velocity, blood (m.p.s.) ...	3·76	3·45	4·81	6·80	8·3	12·7	18·5

(Bramwell, Hill, 1922)

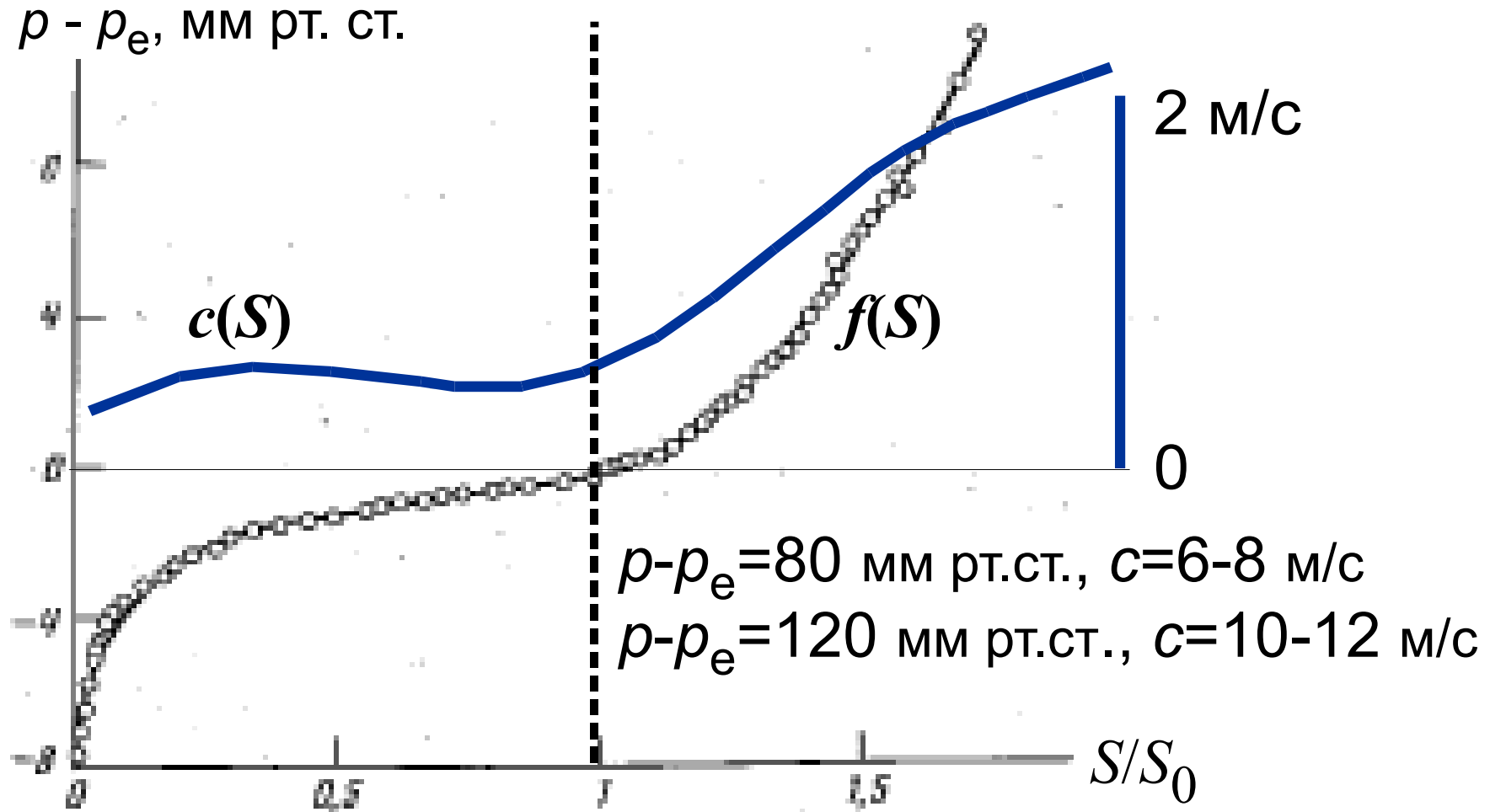
Скорость пульсовой волны *in vivo* растёт с трансмуральным давлением ($p - p_e$)

In a series of ten normal subjects the general characteristics of the curve remained the same. The average values are given below.

Mean effective pressure in mm. Hg	0	10	20	30	40	50	60	70
Mean velocity : metres per second	1·5	1·7	2·1	2·6	3·1	3·7	4·5	4·9

(Bramwell et al., 1922)

Статическая связь площади сечения плечевой артерии человека и трансмурального давления

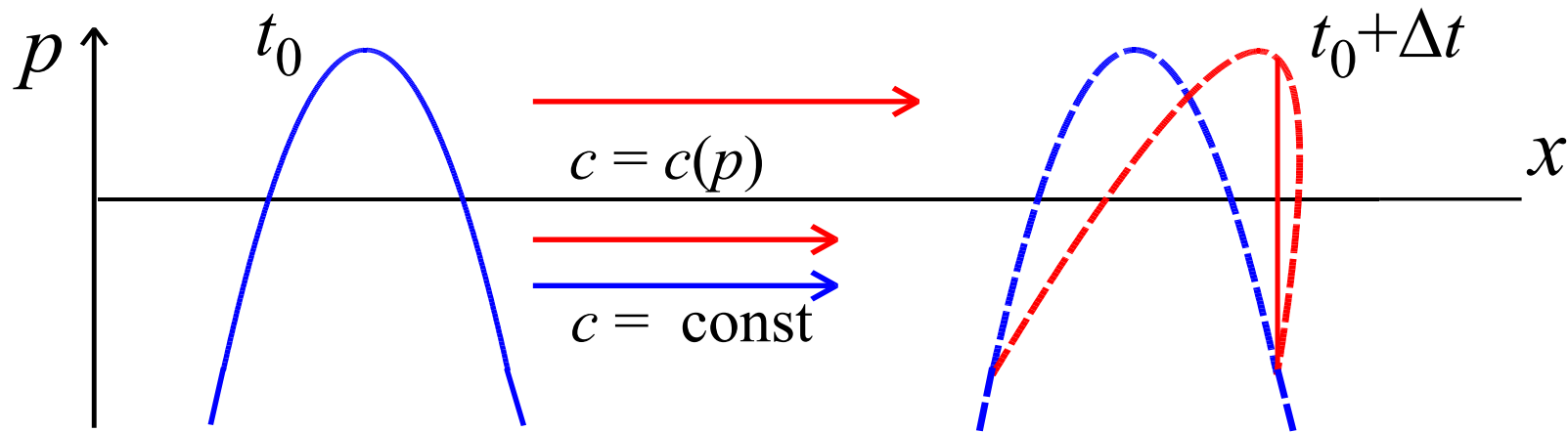


(Саакян, Цатурян, Касьянов, Мунгалов, 1985)

Скорость пульсовой волны:

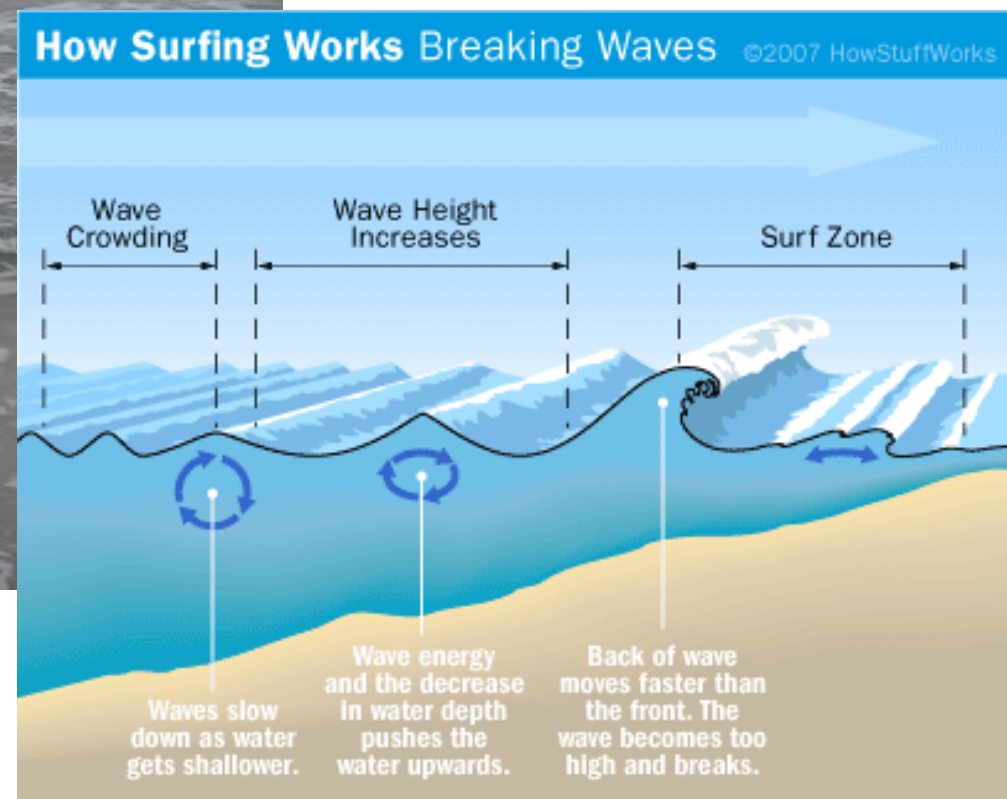
$$c(S) = \sqrt{SK(S) / \rho} = \sqrt{Sf'(S)}, \quad p - p_e = \rho f(S)$$

опрокидывание с образованием «ударных» волн



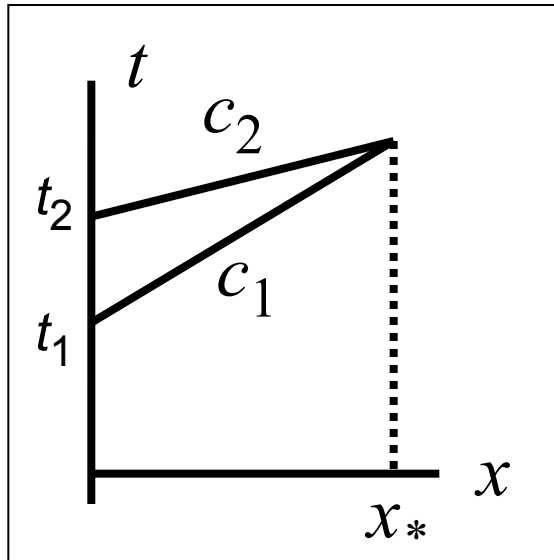
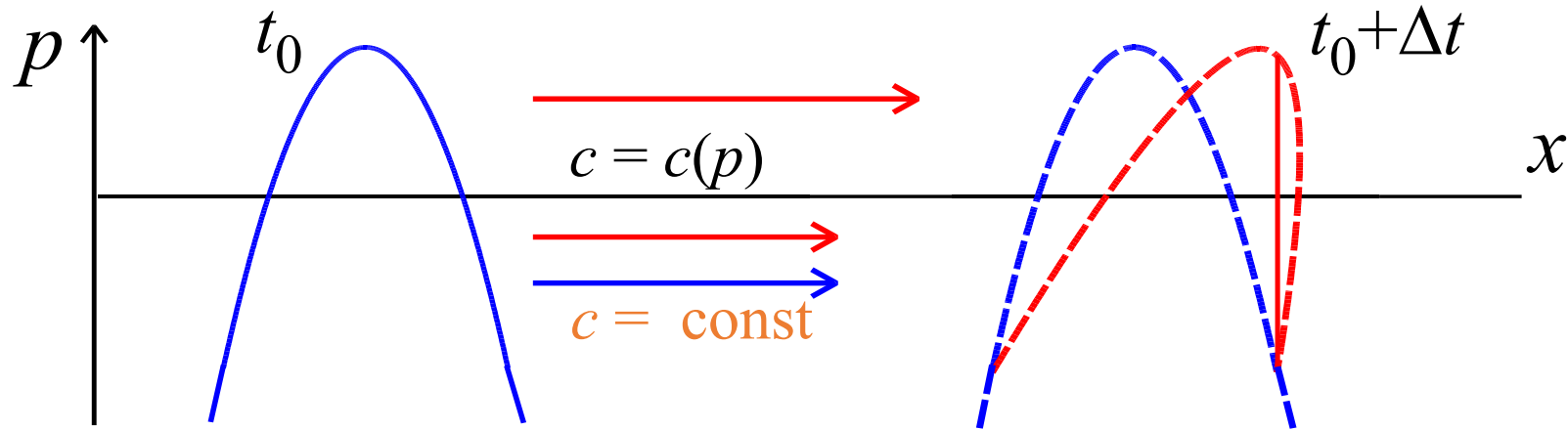
(Bramwell, Hill, 1923; ...)

Опрокидывание волн



Нелинейные волны

опрокидывание с образованием «ударных» волн



$$t_2 - t_1 = \frac{x_*}{c_2} - \frac{x_*}{c_1}, \quad x_* = \frac{c^2(p)}{\frac{\Delta c(p)}{\Delta p} \frac{\Delta p_0(t)}{\Delta t}}$$

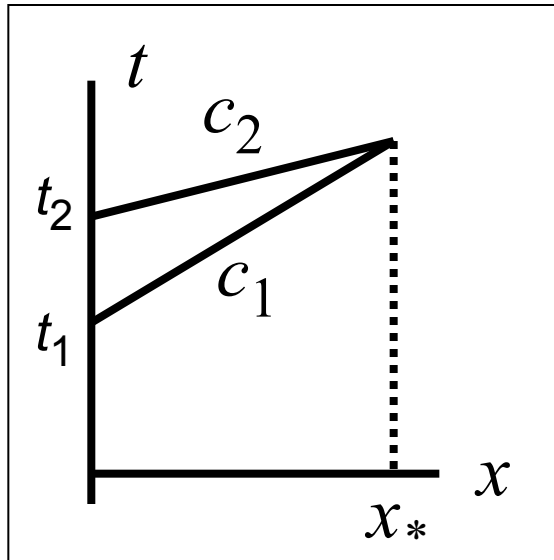
Расстояние, проходимое пульсовой волной до «опрокидывания»

При нулевом давлении в манжете

$$x_* = \frac{(10 \text{ м/с})^2}{1000 \text{ мм рт.ст./с} \cdot 0.1 \text{ м/с/мм рт.ст.}} \approx 100 \text{ см}$$

$$x_* = \frac{(1 \text{ м/с})^2}{1000 \text{ мм рт.ст./с} \cdot 0.2 \text{ м/с/мм рт.ст.}} \approx 0.5 \text{ см}$$

При давлении в манжете между систолическим и диастолическим

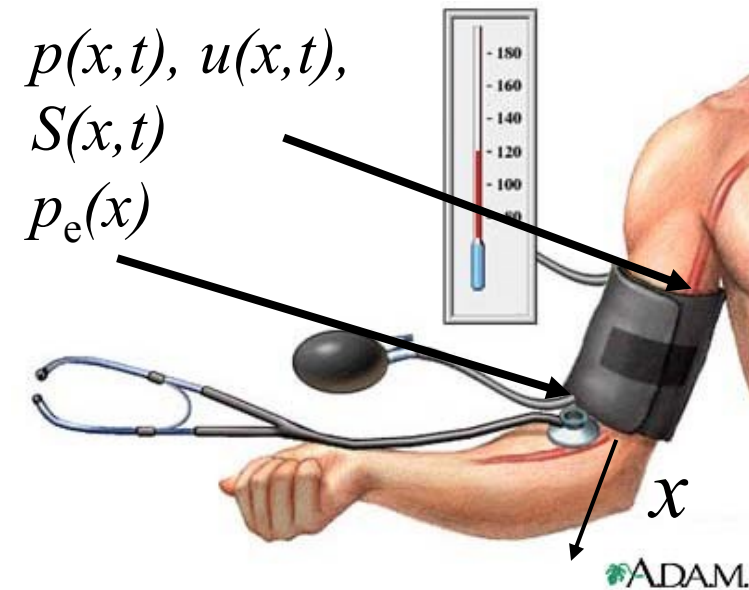


$$t_2 - t_1 = \frac{x_*}{c_2} - \frac{x_*}{c_1}, \quad x_* = \frac{c^2(p)}{\frac{\Delta c(p)}{\Delta p} \frac{\Delta p_0(t)}{\Delta t}}$$

(Bramwell, Hill, 1923; ...)

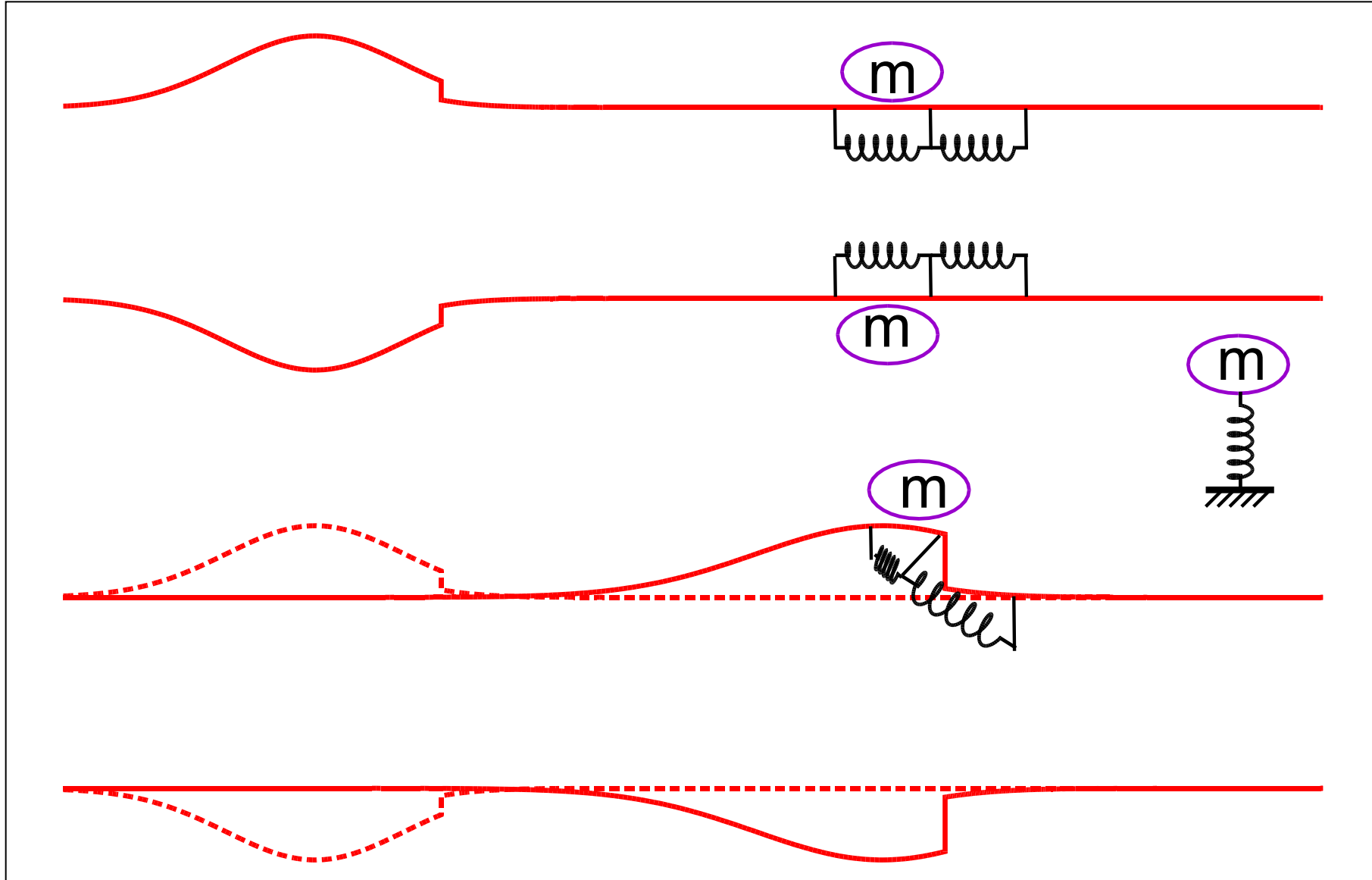
Как и почему возникает звук при
опрокидывании пульсовой волны?

Движение стенки артерии и окружающих мягких тканей

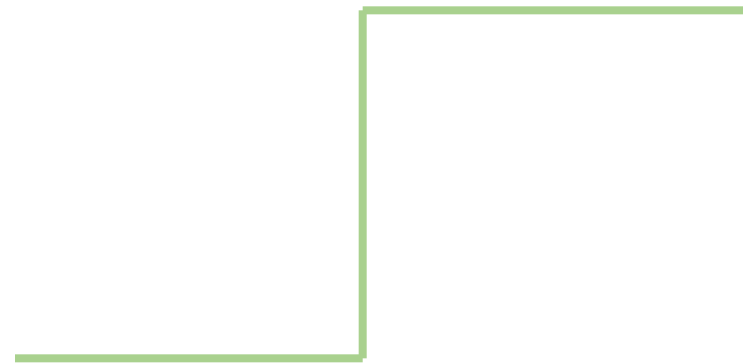


$p = p_e = \rho f(S) +$
+ инерция стенки и окружающих тканей +
+ изгибная жесткость стенки +
+ вязкость стенки и тканей

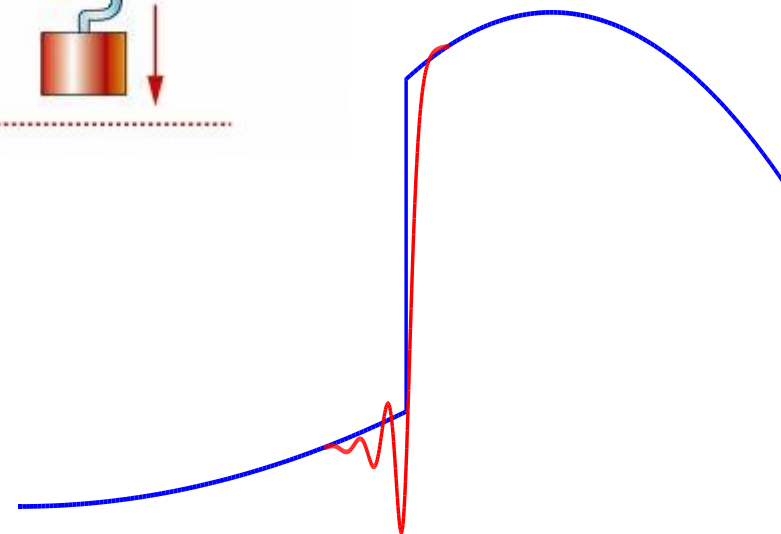
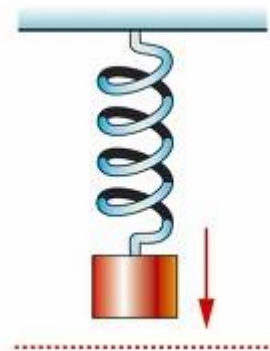
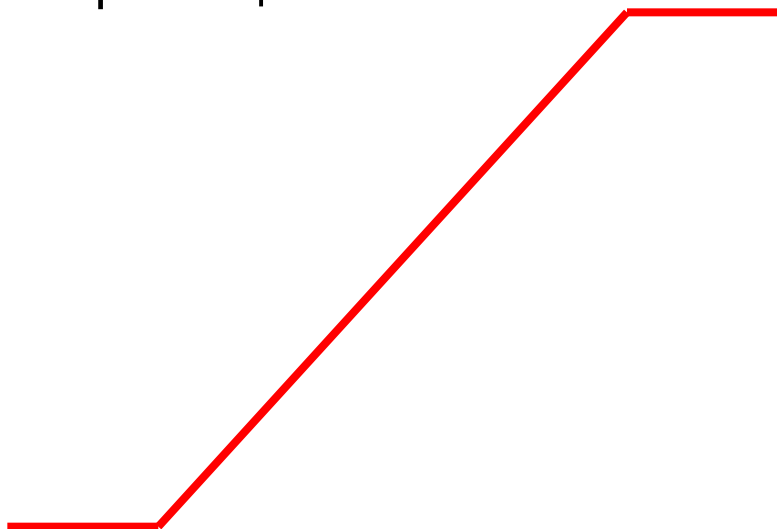
Инерция и жесткость стенки препятствуют образованию
«ударной волны» расправления артерии и вызывают
высокочастотные колебания



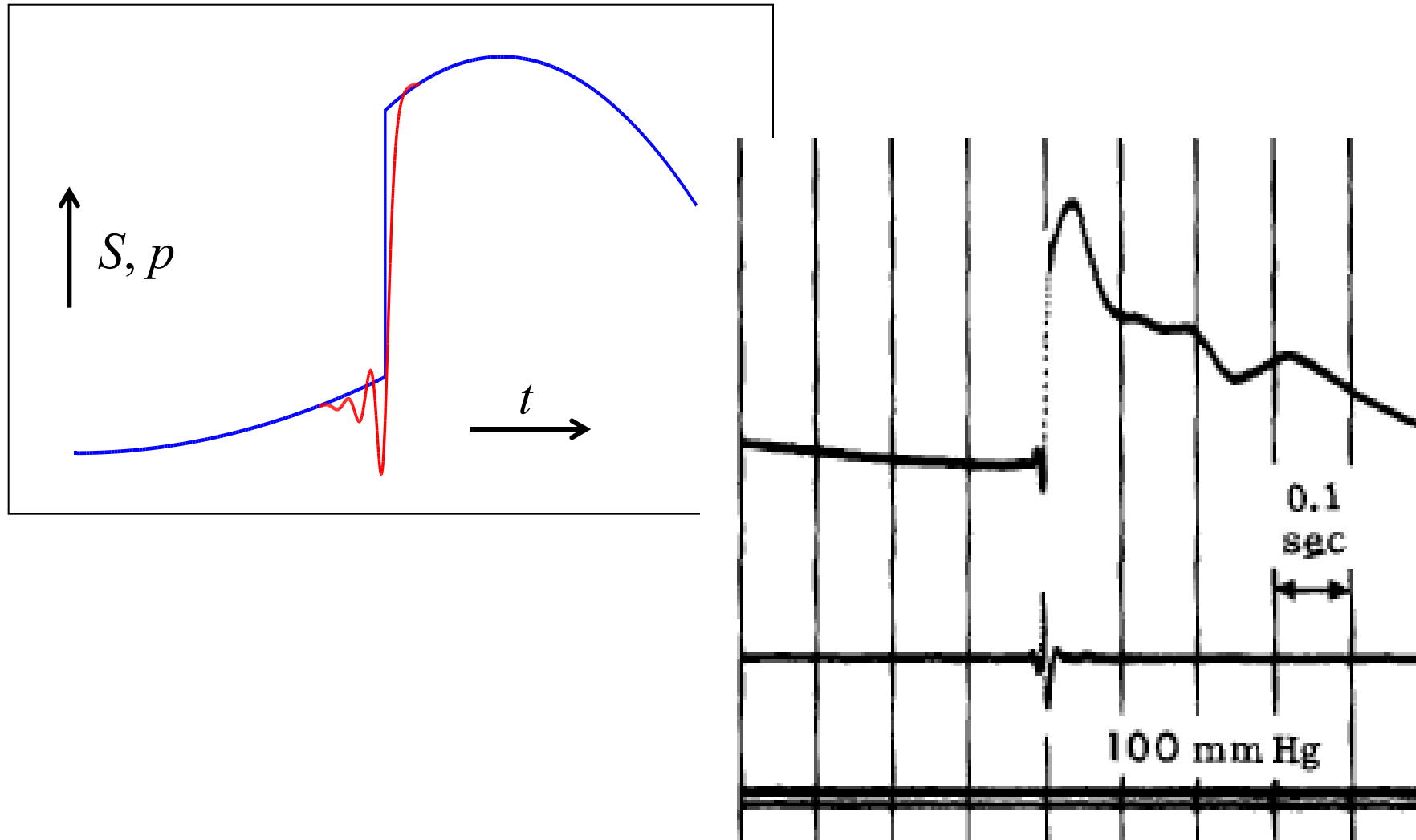
Тянущая сила



Перемещение стенки



Форма «ударной волны» с осциллирующей структурой



**Korotkoff Sounds: Observations on Pressure-Pulse Changes Underlying
Their Formation**

MORTON E. TAVEL, JAMES FARIS, WILLIAM K. NASSER, HARVEY
FEIGENBAUM and CHARLES FISCH

Circulation 1969;39:465-474

- Тоны Короткова – это высокочастотные колебания, возникающие на фронте волны резкого расправления артерии в руке, сдавленной манжетой

Объяснение опытных фактов

- **тоны возникают в систолу под манжетой, их амплитуда максимальна у ее нижнего края;**

Объяснение опытных фактов

- тоны возникают в систолу под манжетой, их амплитуда максимальна у ее нижнего края;
- **частота звуков определяется инерцией и изгибной жесткостью сосудистой стенки и окружающих тканей;**
- **– возрастает при напряжении мышц плеча (Саакян, 1978);**

Объяснение опытных фактов

- тоны возникают в систолу под манжетой, их амплитуда максимальна у ее нижнего края;
- частота звуков определяется инерцией и изгибной жесткостью сосудистой стенки и окружающих тканей;
- – возрастает при напряжении мышц плеча (Саакян, 1978);
- **«бесконечный» тон – «опрокидывание» пульсовой волны без манжеты; для этого нужен очень крутой фронт волны давления или очень «крутая» зависимость $c(p)$;**

$$x_* = \frac{(10 \text{ м/с})^2}{2500 \text{ мм рт.ст./с} \cdot 0.1 \text{ м/с/мм рт.ст.}} \approx 40 \text{ см}$$

$$x_* = \frac{(10 \text{ м/с})^2}{1000 \text{ мм рт.ст./с} \cdot 0.25 \text{ м/с/мм рт.ст.}} \approx 40 \text{ см}$$

$$x_* = \frac{c^2(p)}{\frac{\Delta c(p)}{\Delta p} \frac{\Delta p_0(t)}{\Delta t}}$$

Объяснение опытных фактов

- тоны возникают в систолу под манжетой, их амплитуда максимальна у ее нижнего края;
- частота звуков определяется инерцией и изгибной жесткостью сосудистой стенки и окружающих тканей;
- – возрастает при напряжении мышц плеча (Саакян, 1978);
- «бесконечный» тон – «опрокидывание» пульсовой волны без манжеты; для этого нужен очень крутой фронт волны давления или очень «крутая» зависимость $c(p)$;
- **пережатие артерии ниже места регистрации звуков приводит к снижению их амплитуды;**

Объяснение опытных фактов

- тоны возникают в систолу под манжетой, их амплитуда максимальна у ее дистального края;
- частота звуков определяется инерцией и изгибной жесткостью сосудистой стенки и окружающих тканей;
- – возрастает при напряжении мышц плеча (Саакян, 1978);
- «бесконечный» тон – «опрокидывание» пульсовой волны без манжеты; для этого нужен очень крутой фронт волны давления или очень «крутая» зависимость $c(p)$;
- пережатие артерии ниже места регистрации звуков приводит к снижению их амплитуды;
- **«аускультаторный провал», по-видимому, связан с особенностями отражения пульсовых волн при некоторых патологиях.**



Самвел Самвелович Григорян

академик РАН, бывший директор
Института механики МГУ, выпускник
кафедры гидромеханики

Юрий Завенович Саакян

выпускник кафедры гидромеханики
мех.-мата МГУ, канд. физ.-мат. наук,
директор Института проблем
естественных монополий



Сергей Аркадиевич Регирер

доктор физ.-мат. наук, профессор МГУ

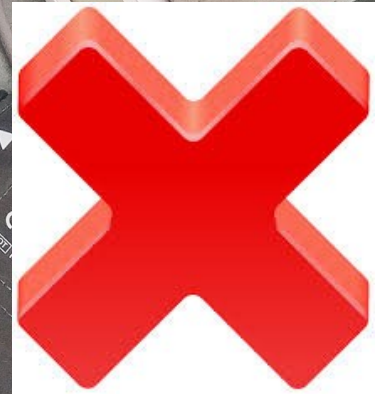
Драга Пихлер

выпускница кафедры гидромеханики
мех.-мата МГУ, PhD Кембриджа, сотрудница
университета Манчестера

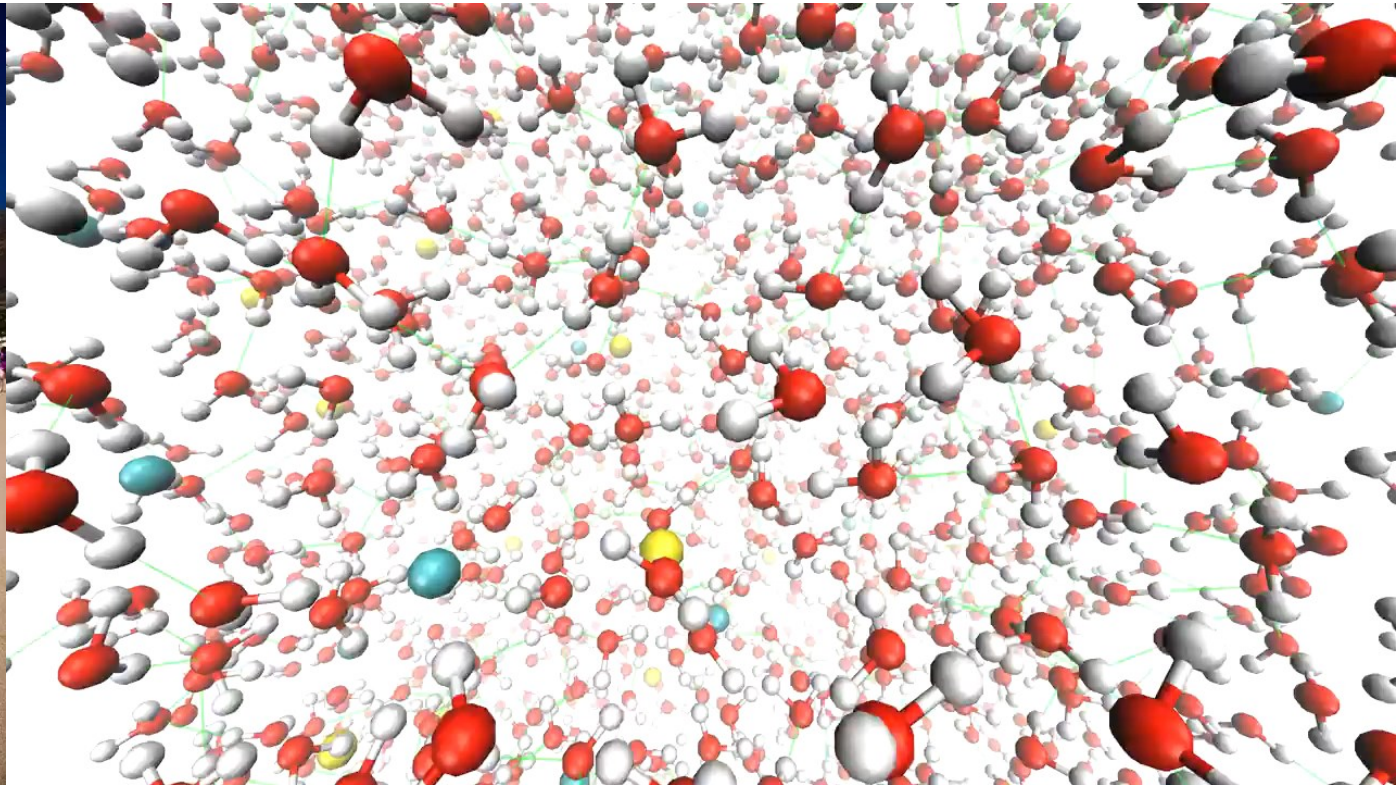


Звуковой (Коротковский) метод измерения артериального давления гораздо точнее, чем осцилляторный, используемый в автоматических манометрах.

Обязательно калибруйте автомат для данного пациента!



Все живое содержит воду



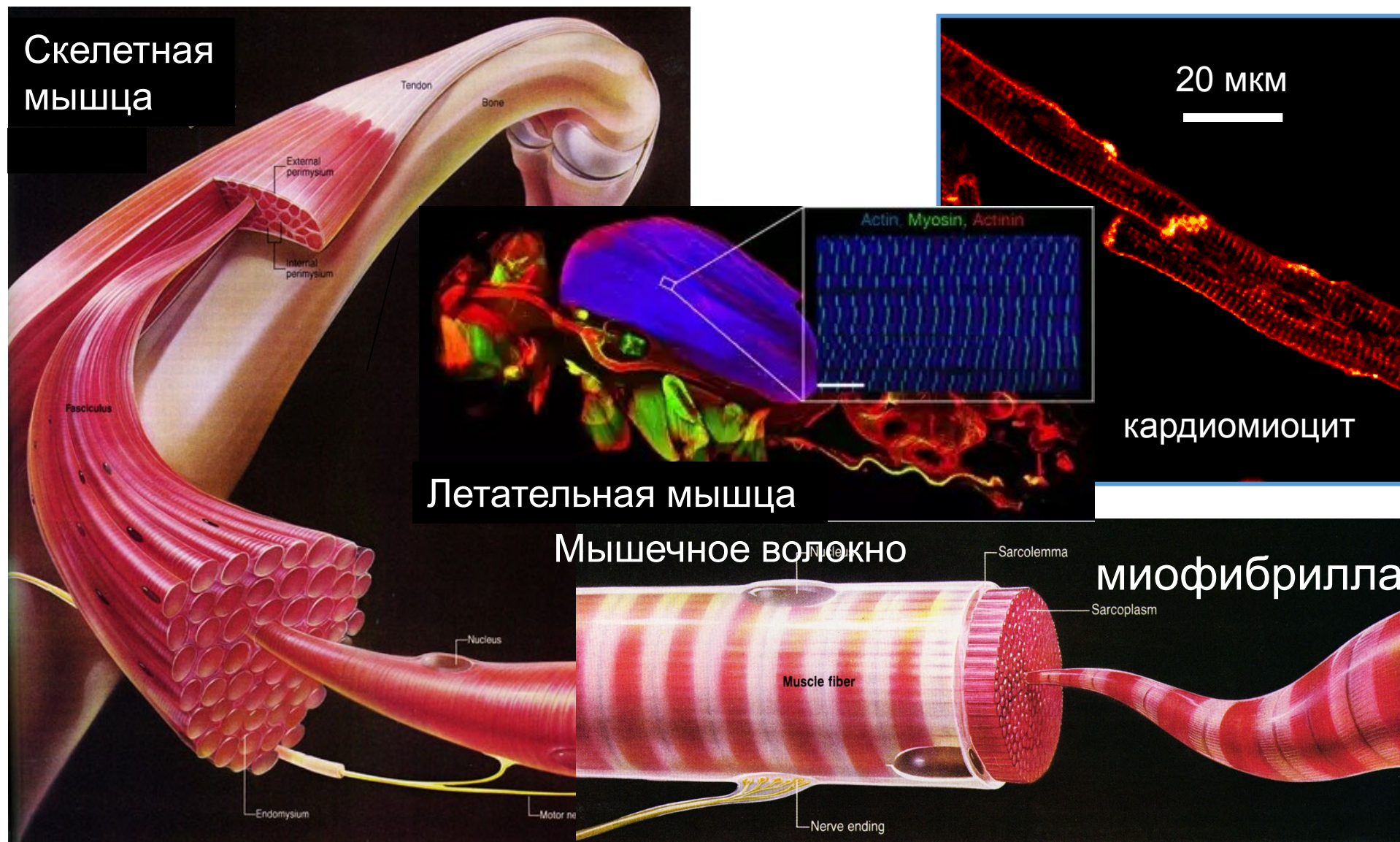
Полет насекомых или «тяжелый» воздух

Полет насекомых или «тяжелый» воздух

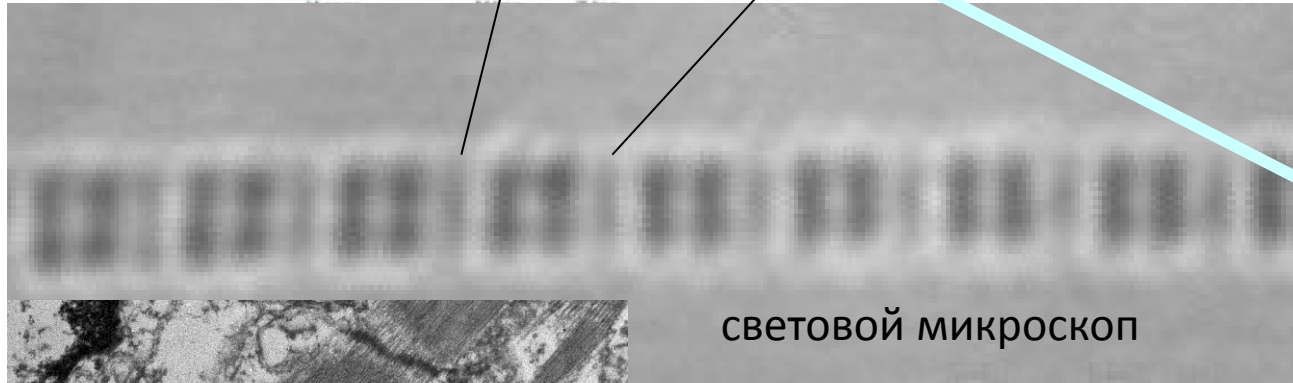
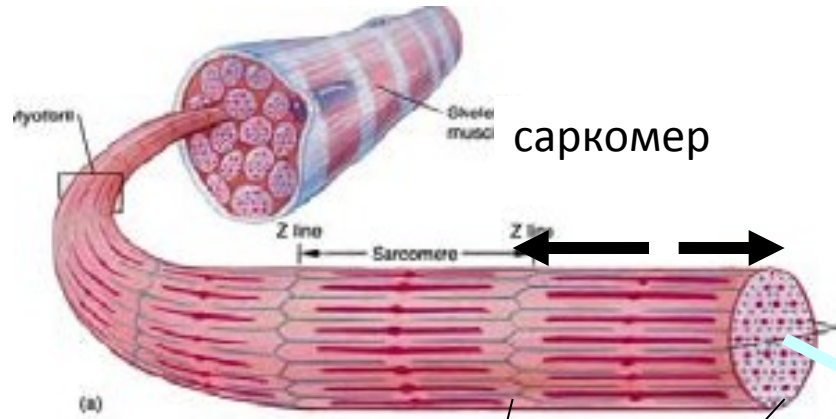


Строение мышц и механизм их работы

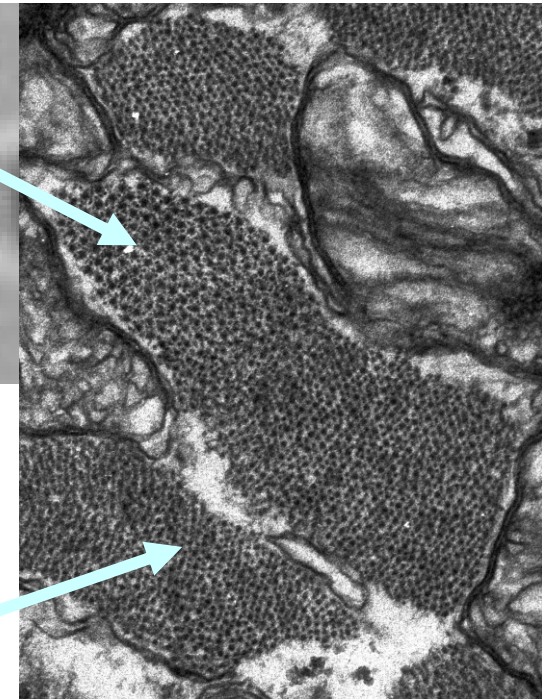
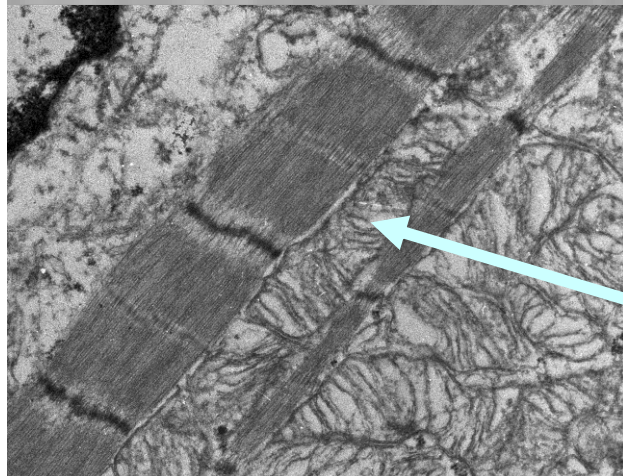
Мышца, клетка, миофибрилла



Саркомер, толстые и тонкие нити



световой микроскоп



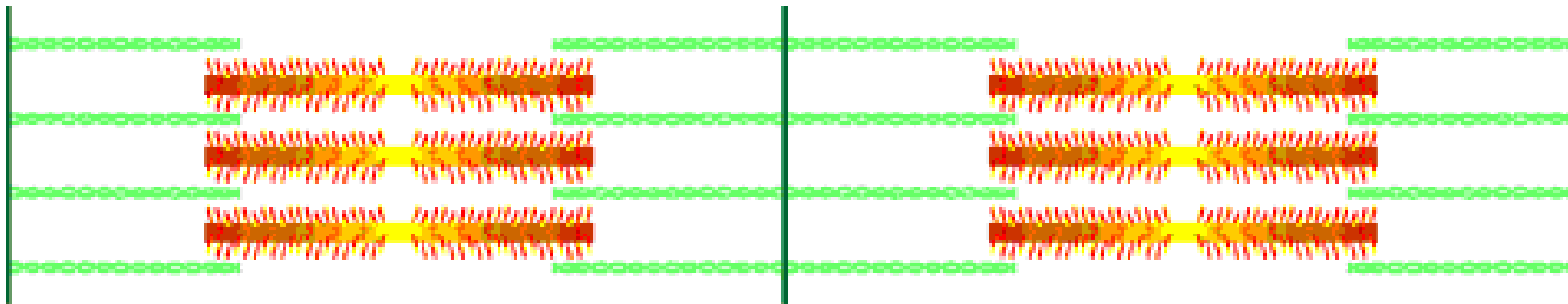
Скользящие нити

No. 4412 May 22, 1954 N A T
**STRUCTURAL CHANGES IN
MUSCLE DURING CONTRACTION**
**Interference Microscopy of Living Muscle
Fibres**
By A. F. HUXLEY and DR. R. NIEDERGERKE*
Physiological Laboratory, University of Cambridge

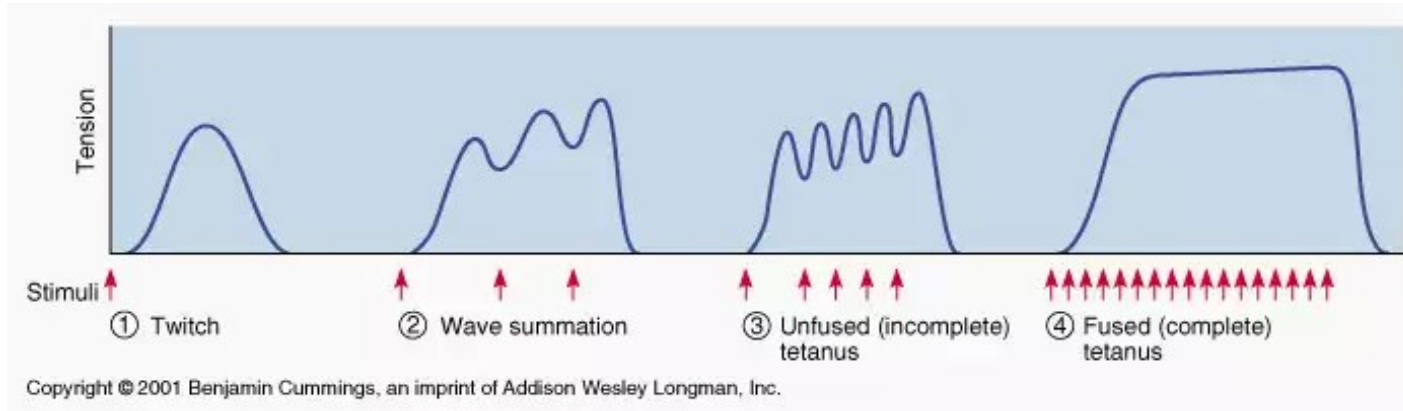


**Changes in the Cross-Striations of Muscle
during Contraction and Stretch and their
Structural Interpretation**

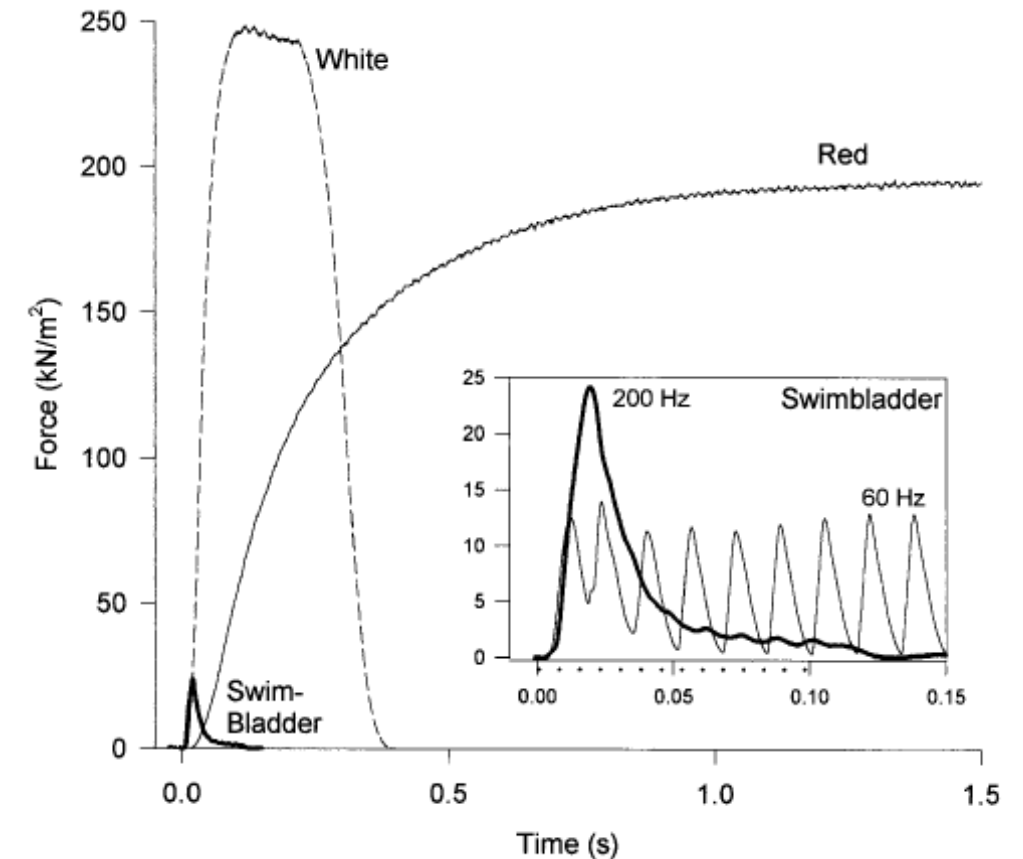
By DR. HUGH HUXLEY* and DR. JEAN HANSON†
Department of Biology, Massachusetts Institute of
Technology, Cambridge, Massachusetts



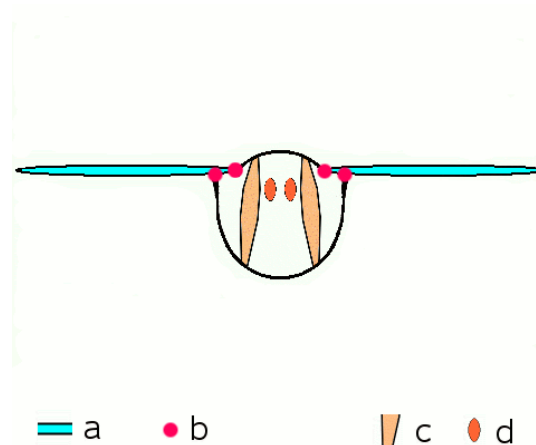
Одиночное сокращение и тетанус



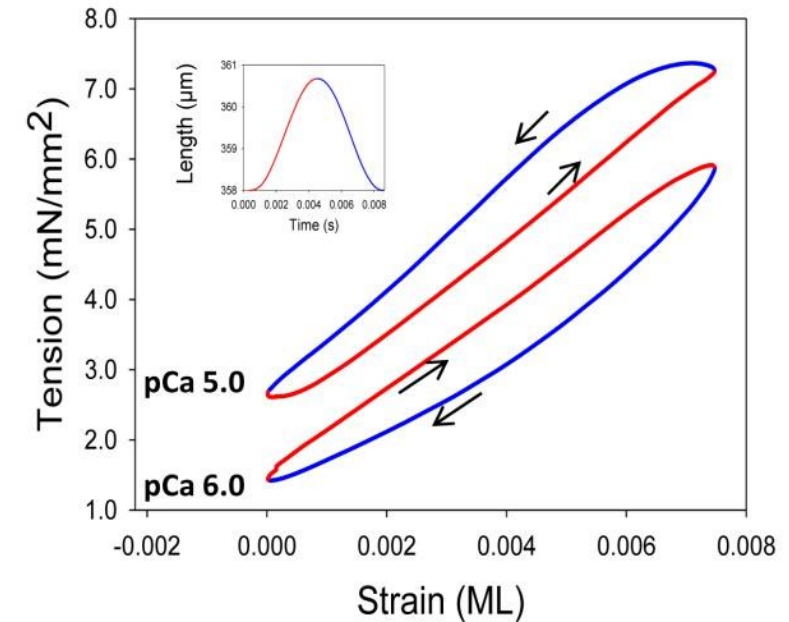
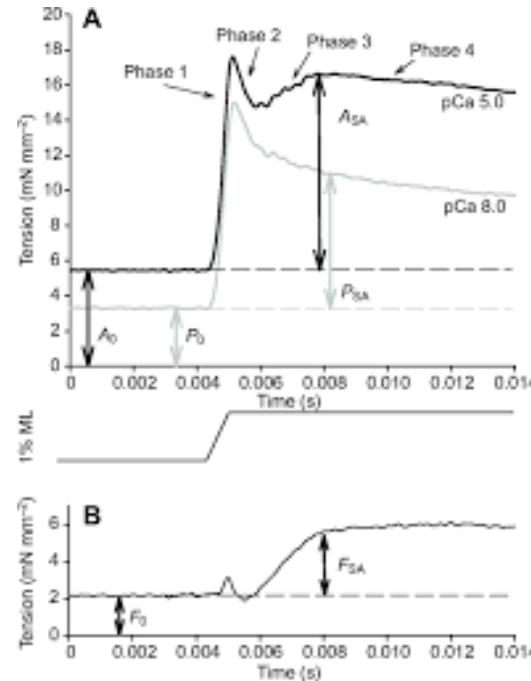
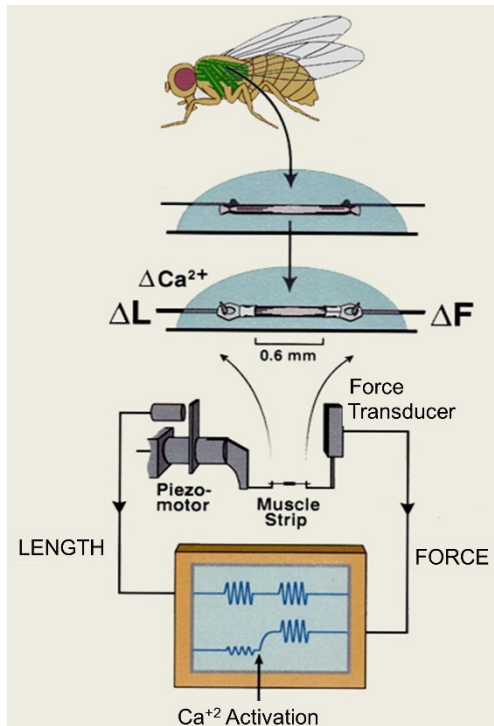
Мышца любовной песни рыбы-жабы —
самая быстрая скелетная мышца в мире



Летательные мышцы насекомых: до 1000 Гц



U. Oregon, 1989



отрицательная вязкость

Крыло насекомого – грузик на пружинке с отрицательной вязкостью



Fundamental Frequency

$$F_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Stiffness

Mass



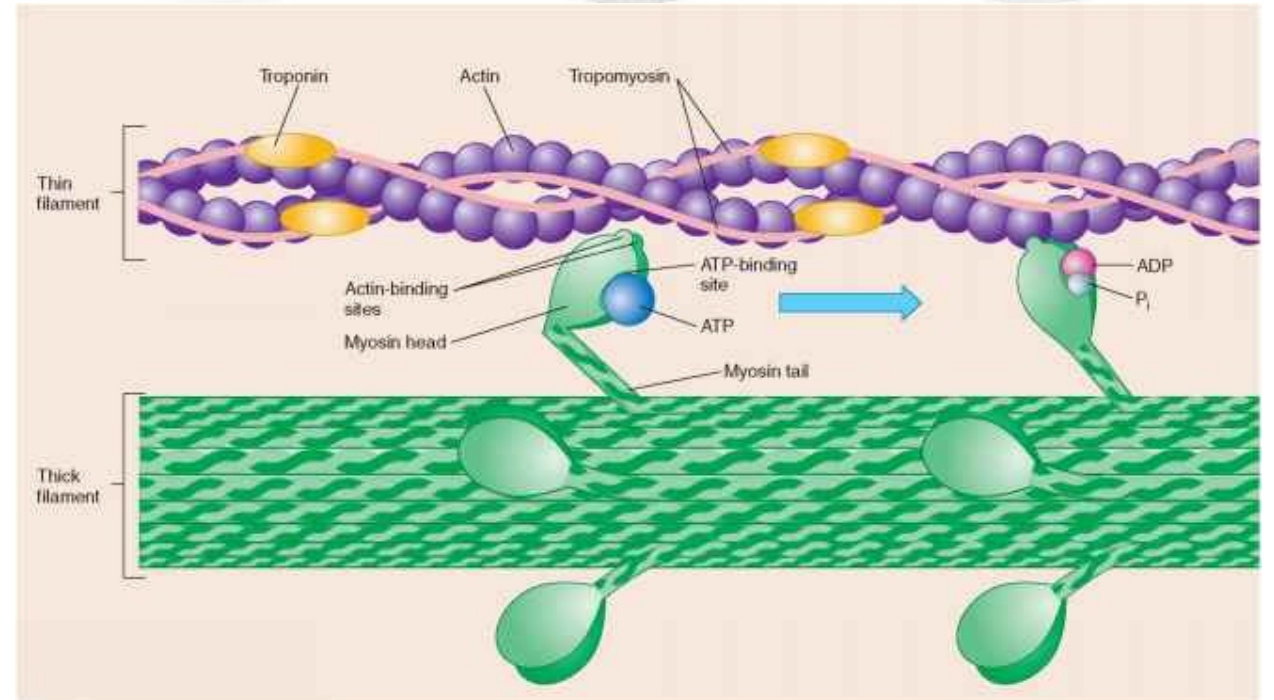
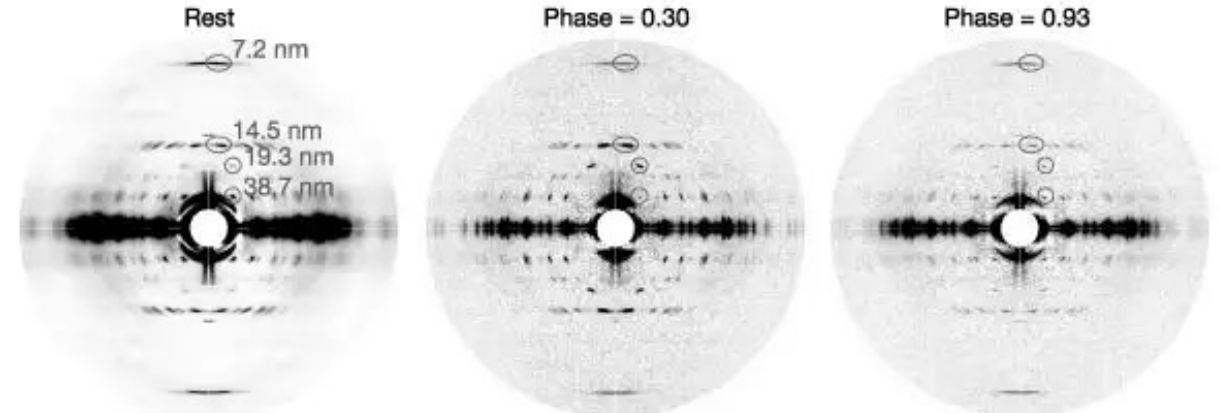
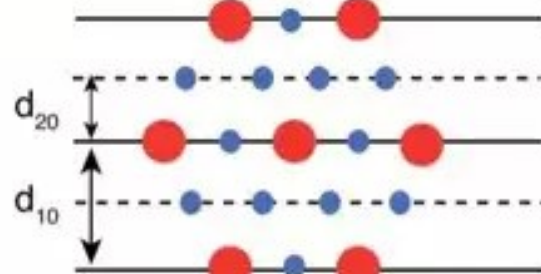
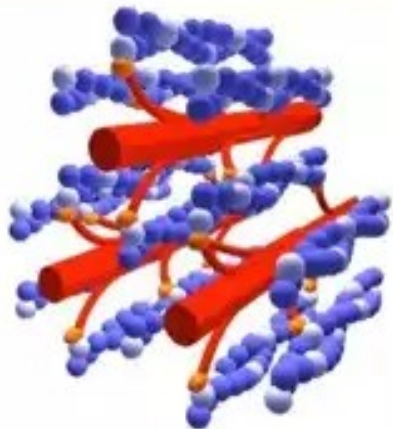
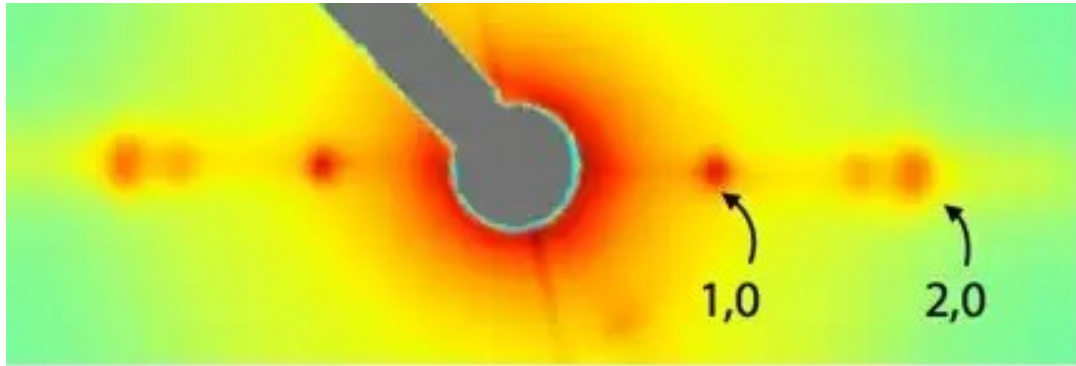
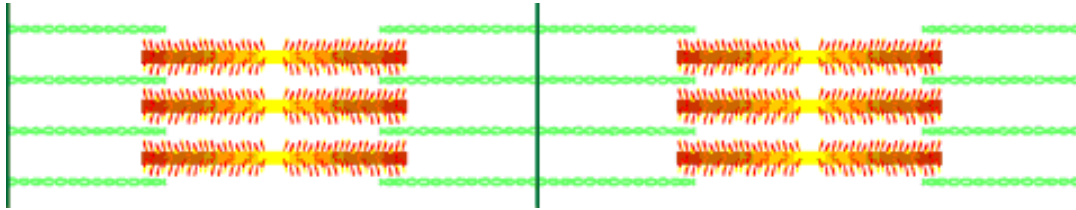
Присоединенная масса воздуха

$$m \approx 0.0012 \text{ мГ}$$

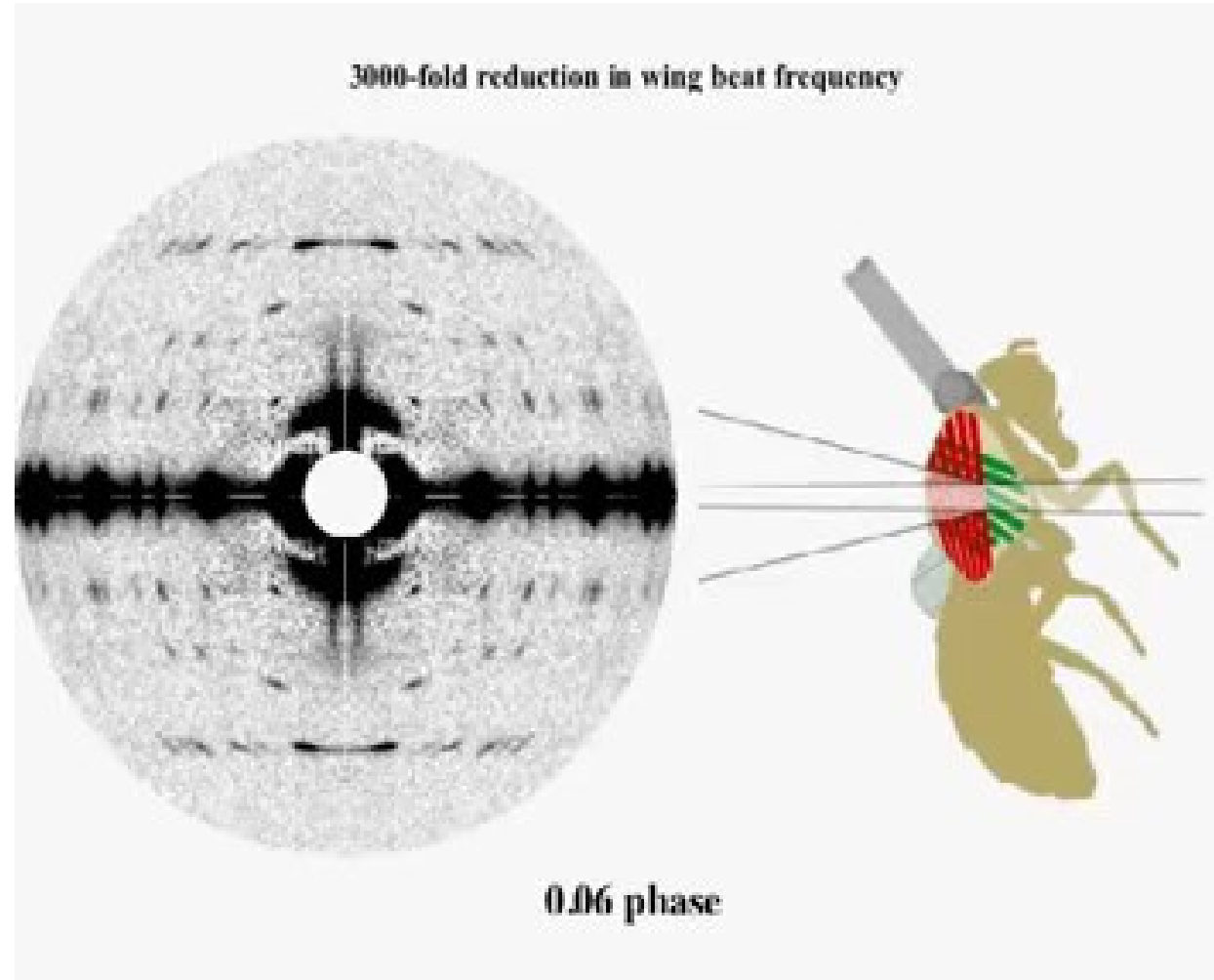
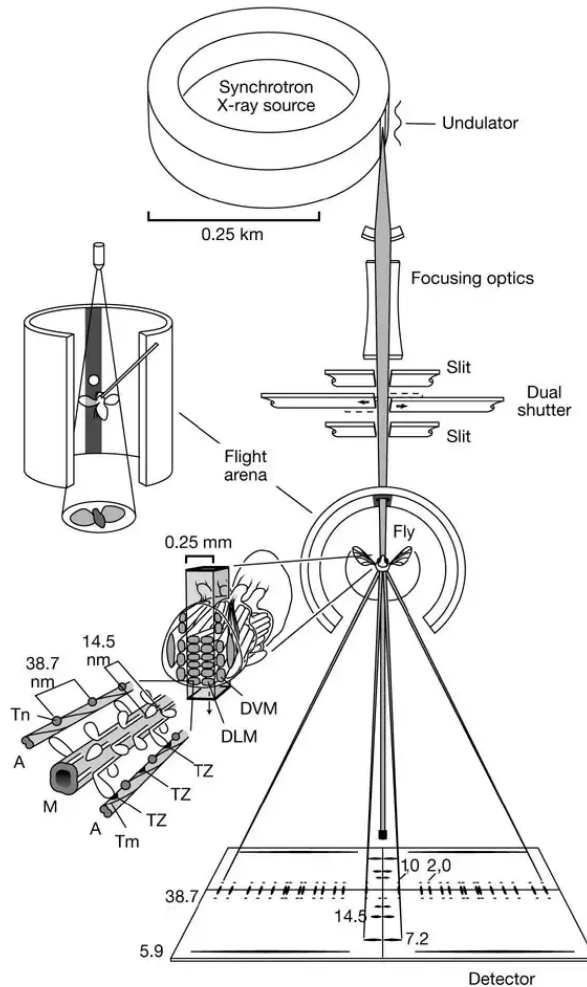
$$k \approx 0.015 \text{ Н/м}$$

$$F_0 \approx 200 \text{ Гц}$$

Рентгеновская дифракция – метод изучения движения молекул в работающей мышце



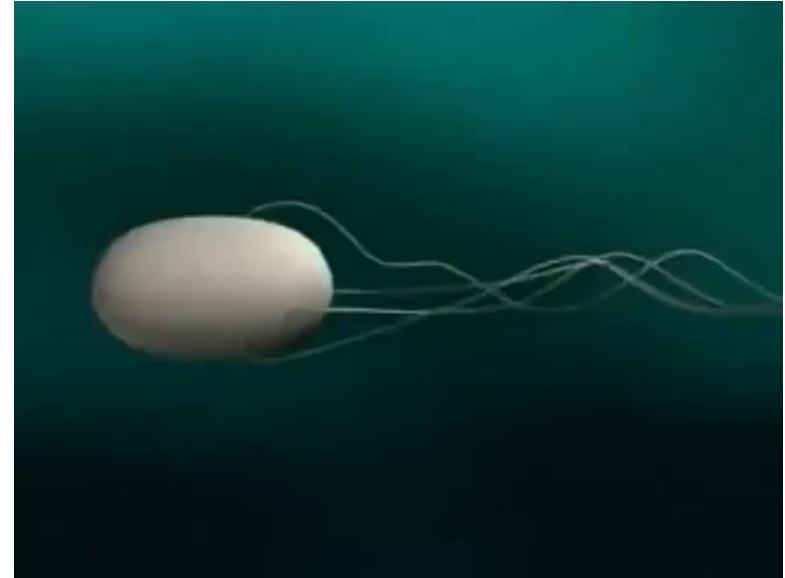
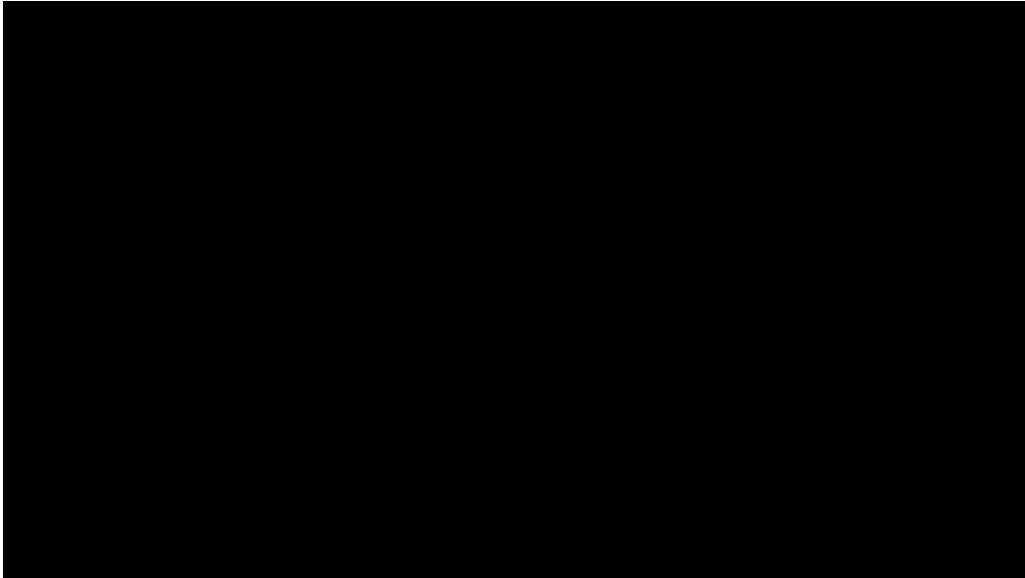
Исследование молекулярных механизмов работы летательных мышц дрозофилы: тренажер для мухи и рентгено-дифракционное кино



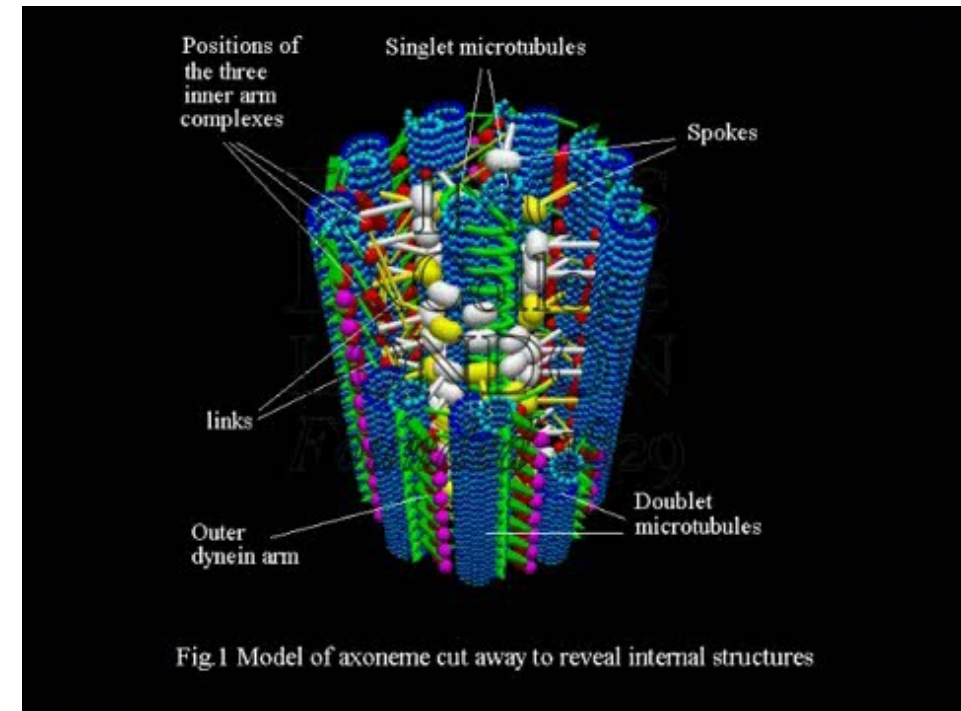
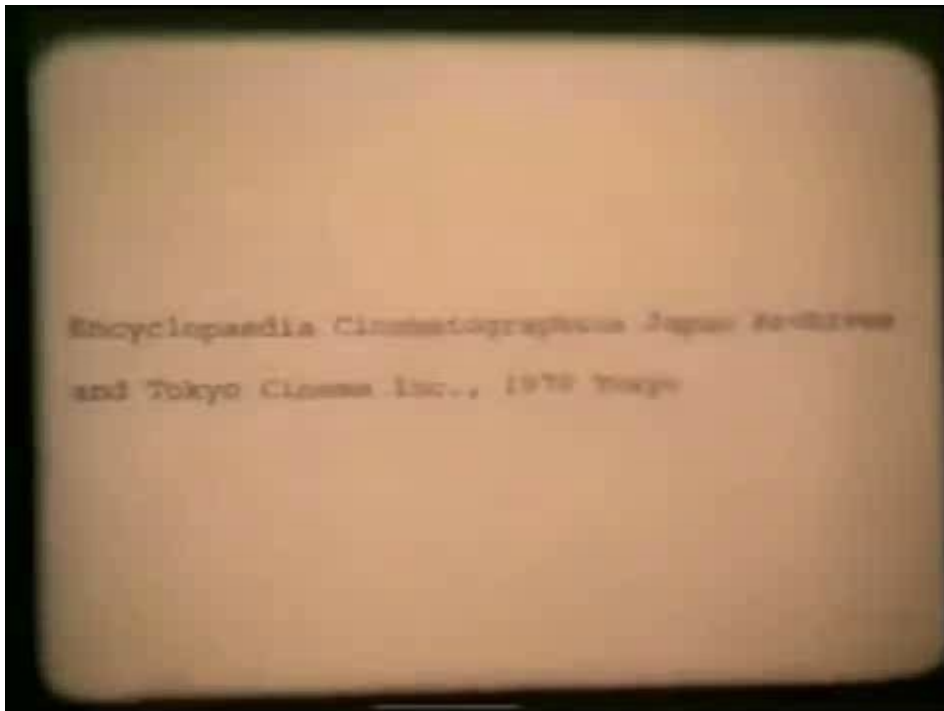
Летательные мышцы насекомых – автоколебательная система. Частота взмахов крыльев определяется жесткостью мышц (зависящей от концентрации ионов кальция) и «присоединенной» к крылу массы воздуха.

Ползущие в сиропе

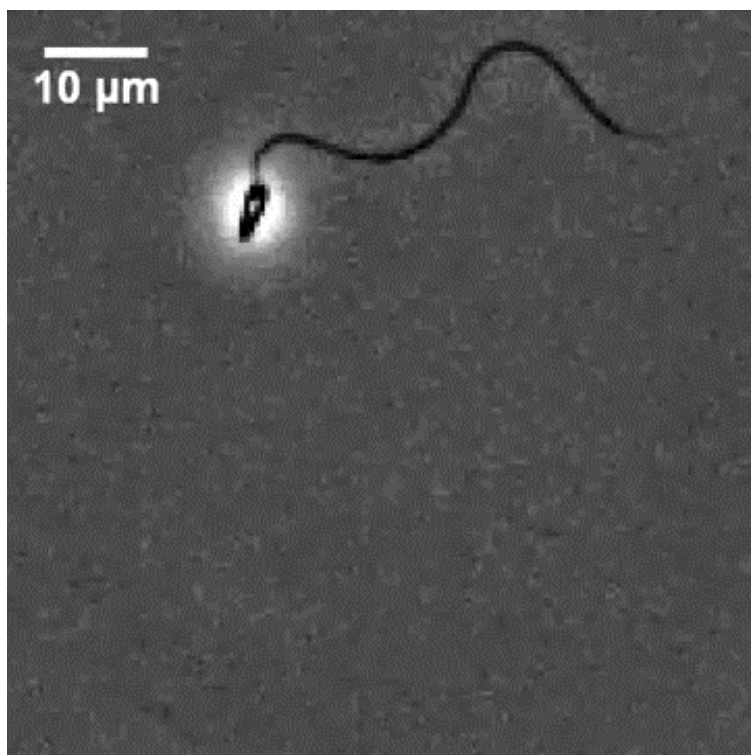
жгутики бактерий – водородные двигатели



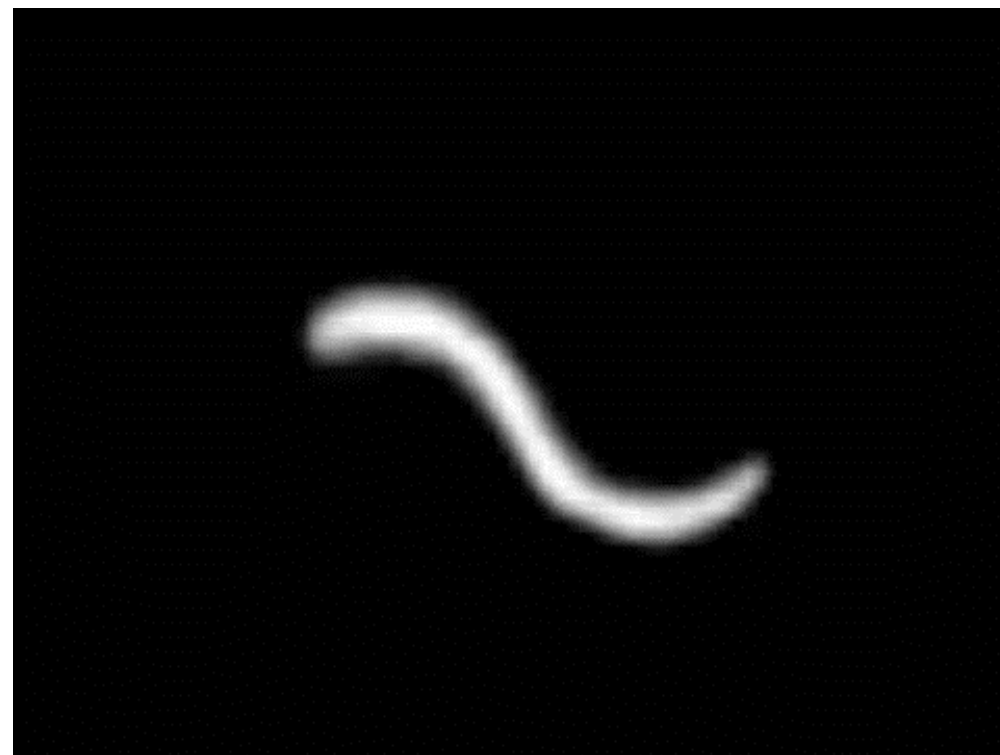
Ползущие в сиропе реснички – моторизованные хлысты



Ползущие в сиропе реснички есть и у нас с вами



Движение сперматозоида



Реснички дыхательных путей

Почему мы не можем плавать с помощью жгутиков и ресничек?



А.С. Пушкин, «Сказка о попе и работнике его Балде»

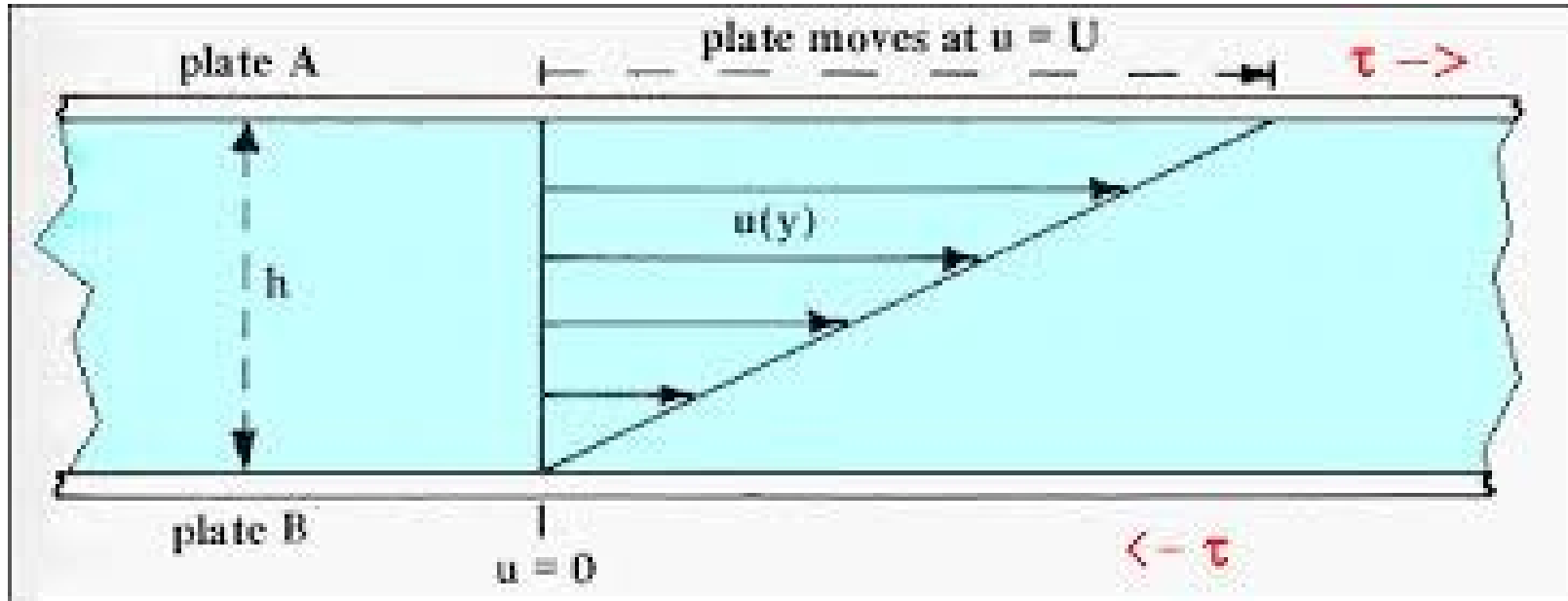
Вязкость жидкостей

Вода



Глицерин

Вязкость жидкостей



$$F = \mu S \frac{U}{h}$$

Вязкость, размер и параметр подобия

L , T , μ , ρ – длина, период, вязкость, плотность

$$\frac{L^2 \rho}{T \mu}$$

Величина	Ресничка в воде	Балда в глицерине
L , мкм	10	1000000 (1 м)
μ/ρ , 10^{-3} м ² /с	1	10000
T , с	0.1	100000 (1.2 дня)

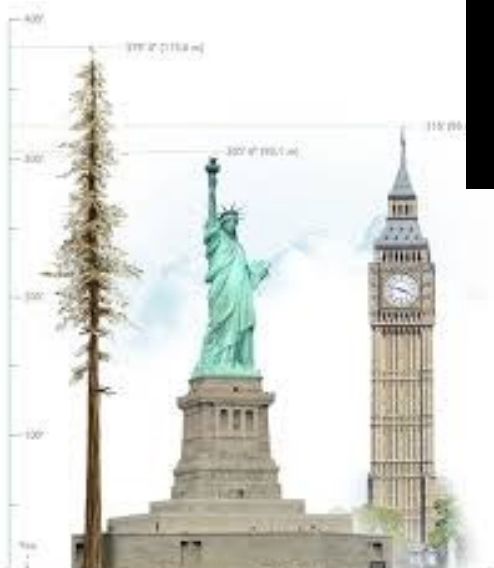
Размер имеет значение!

Что хорошо маленькому, не всегда
подойдет большому

Вода поднимается в небо

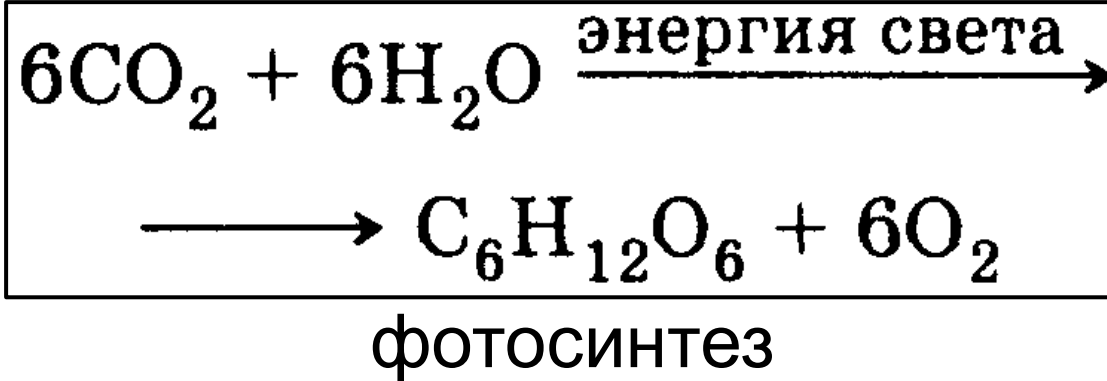
Самые большие живые организмы на Земле

Высота до 120 м, диаметр ствола до 10 м, объем до 1500 м³, вес до 1900 т



Самые большие живые организмы на Земле

Высота до 120 м, диаметр ствола до 10 м, объем до 1500 м³, вес до 1900 т



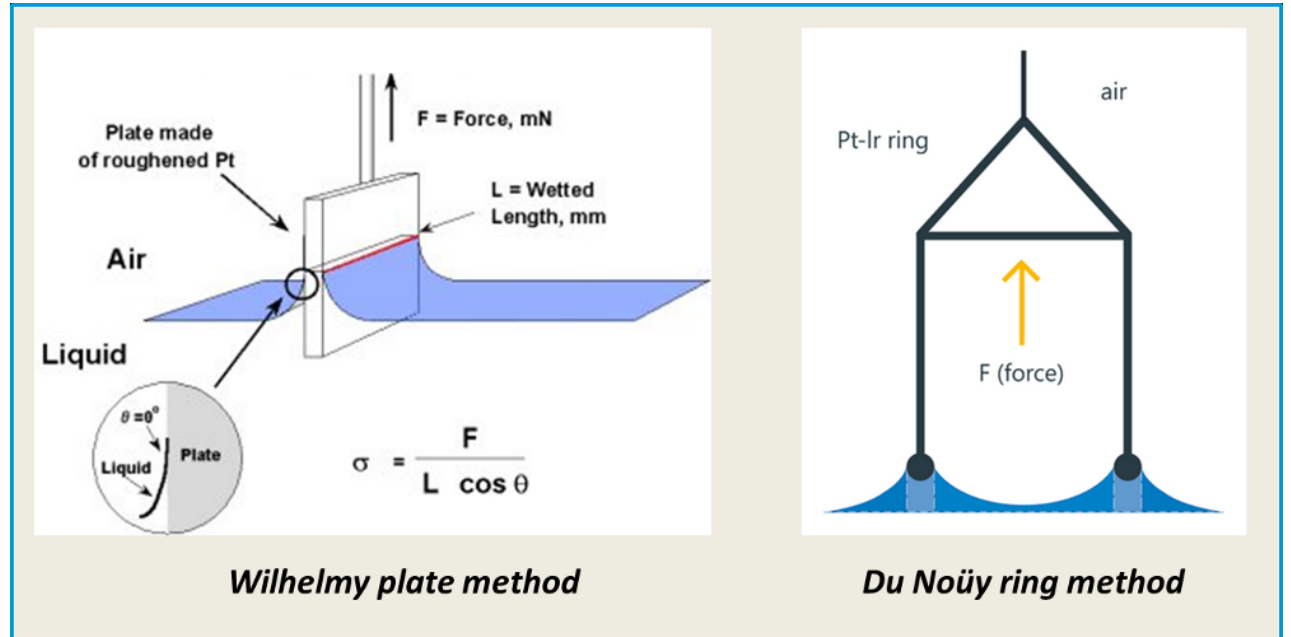
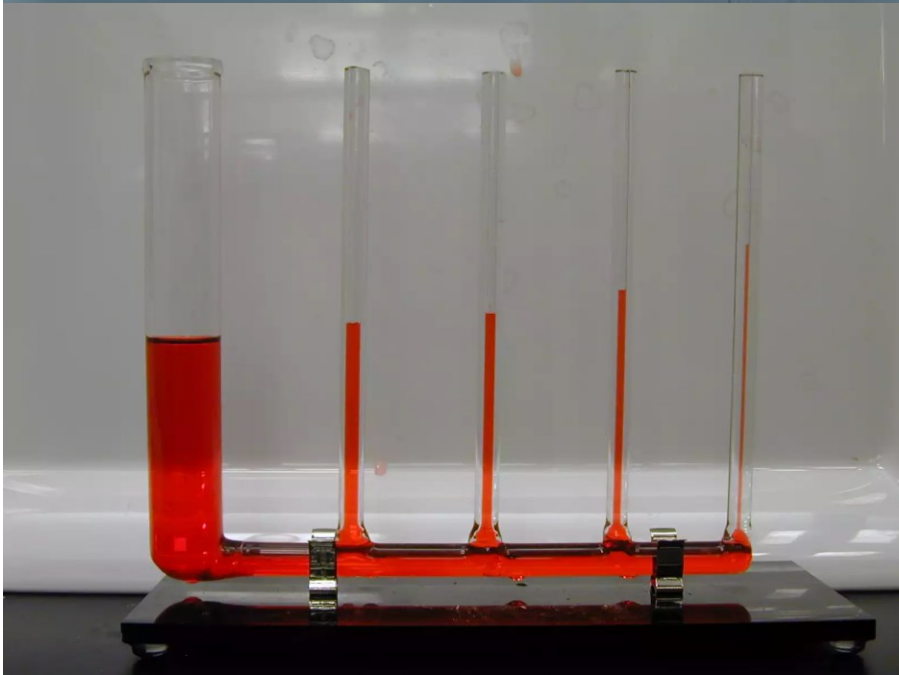
На изготовление 100 кг сахара уходит 58 л воды. Но дереву нужно в 1000 раз больше!

Гигантская секвойя прокачивает до 2000 л воды в день от корней в крону.

Как она это делает?



Поверхностное натяжение жидкости



Поверхностное натяжение жидкости

$$\rho g H = \frac{\sigma}{2r}$$

$$r = 100 \text{ мкм} = 0.01 \text{ см}$$

$$\rho = 1 \text{ г/см}^3$$

$$g = 981 \text{ см/с}^2$$

$$\sigma = 70 \text{ дин/см}$$

$$H = 2800 \text{ см} = 28 \text{ м}$$

Поверхностное натяжение жидкости
не может поднять столб воды на высоту больше 10 м

$$\rho g H = \frac{\sigma}{2r}$$

$$r = 0.5 \text{ мкм}$$

$$\rho = 1 \text{ г/см}^3$$

$$g = 981 \text{ см/с}^2$$

$$\sigma = 70 \text{ дин/см}$$

$$H = 2800 \text{ см} = 28 \text{ м}$$

Кавитация – образование пузырьков пара в жидкости:
кипение при низкой температуре и отрицательном давлении

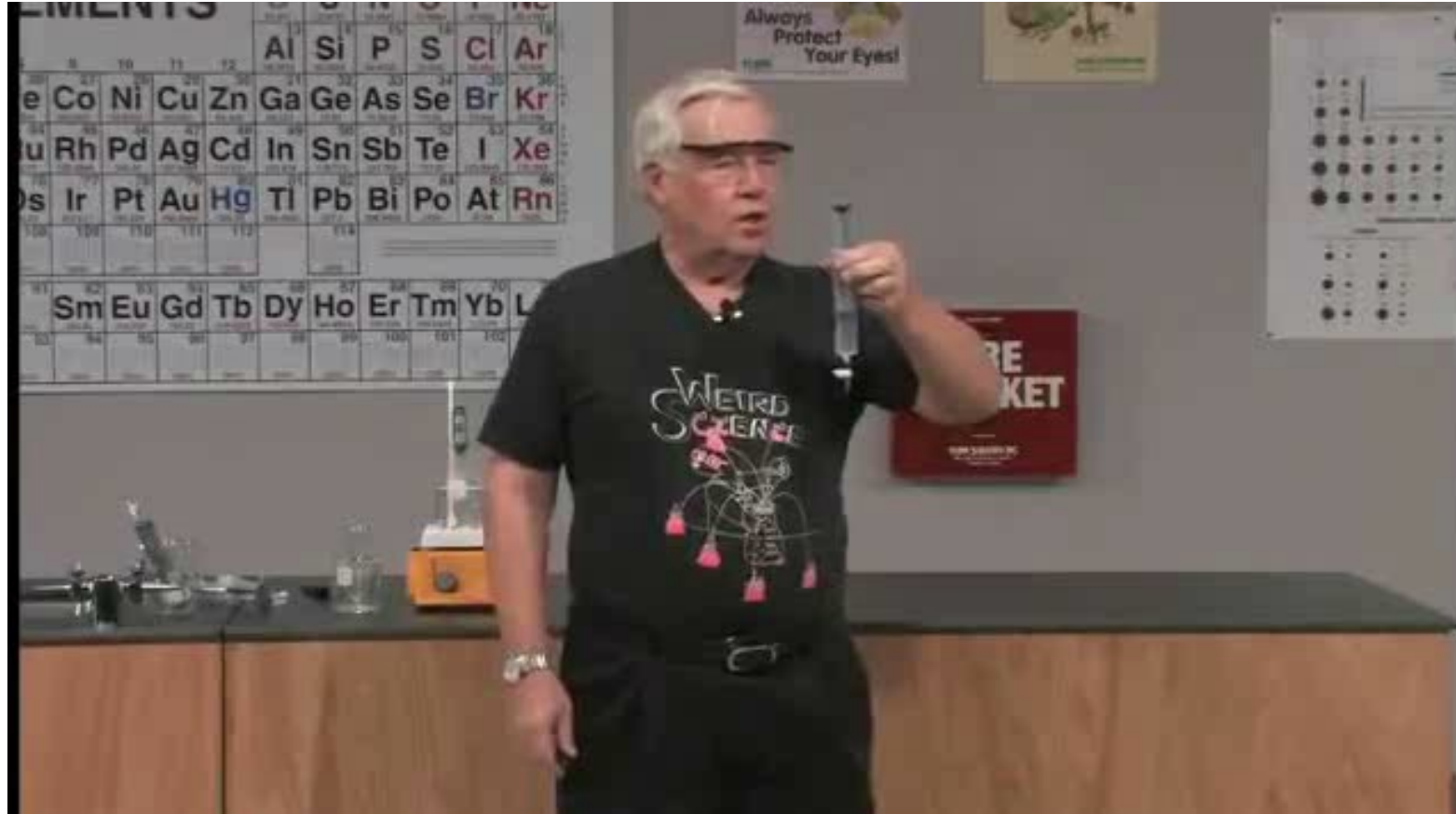


“Turbinia”



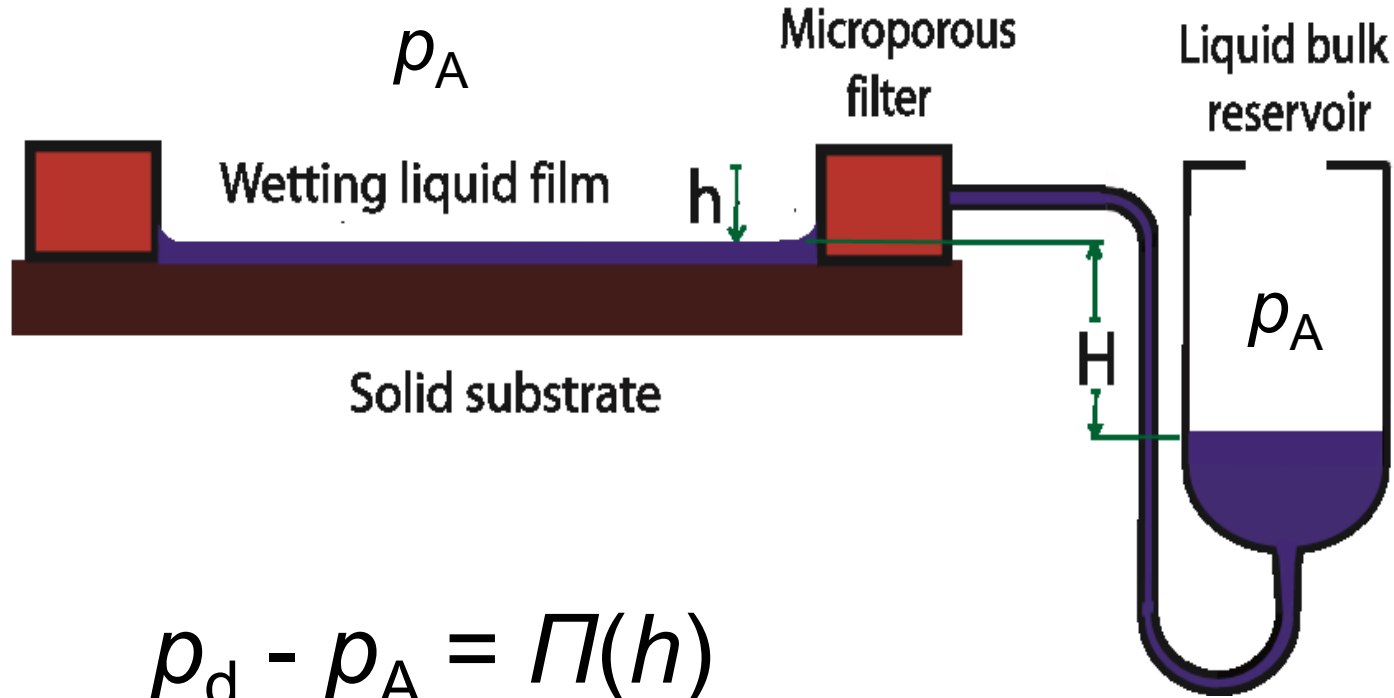
Уравнение Бернулли: $p_0 = p + \rho \frac{v^2}{2}$

Кавитация – образование пузырьков пара в жидкости:
кипение при низкой температуре и отрицательном давлении

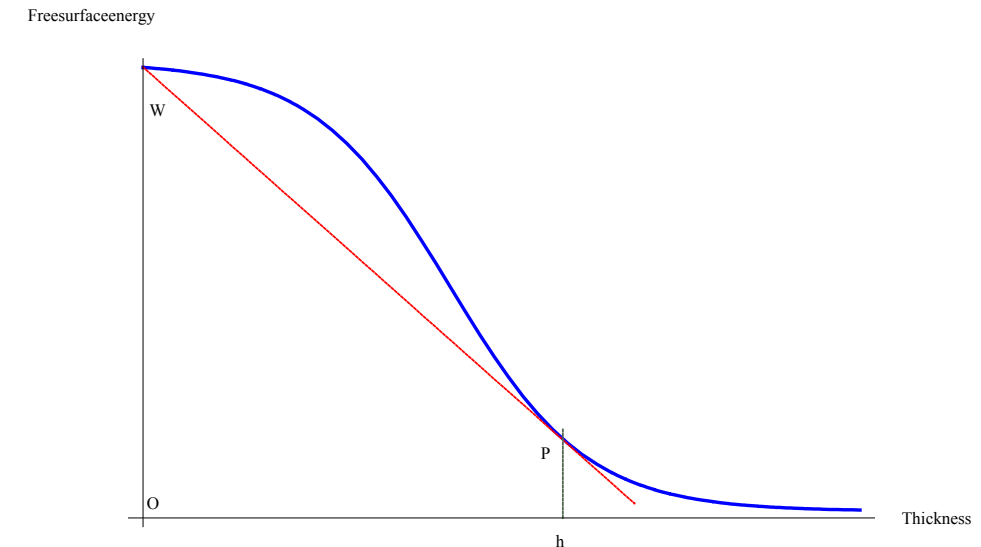


В порах ксилемы нет сплошного столба воды

Расклинивающее давление в тонких пленках жидкости законы гидростатики меняются



(Шелудько и др., 1966, Дерягин и др. 1985)



Зависимость расклинивающего давления от толщины пленки воды

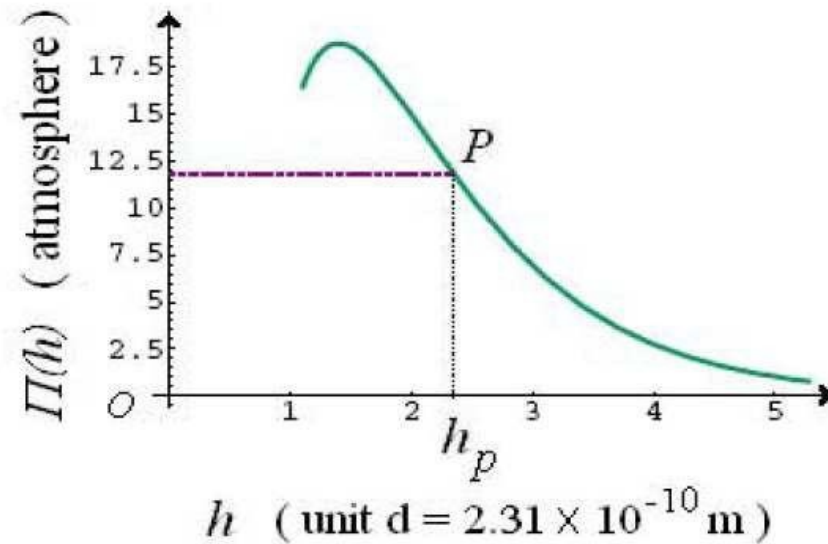
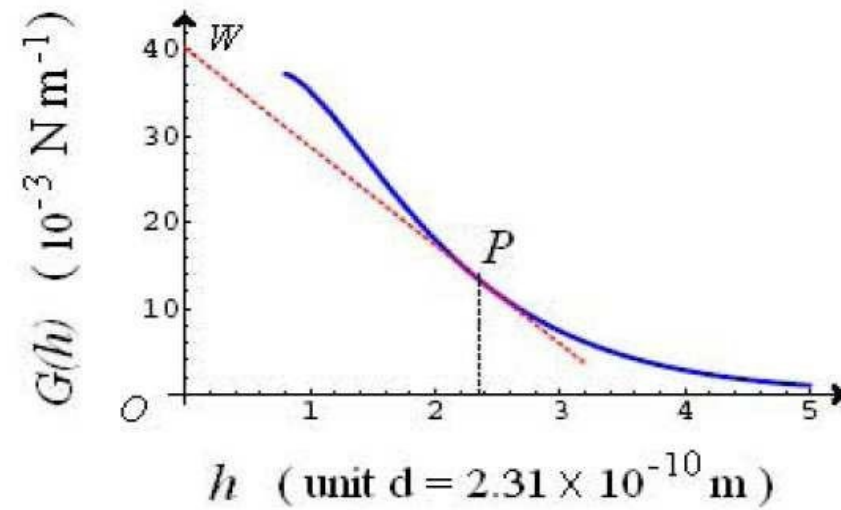
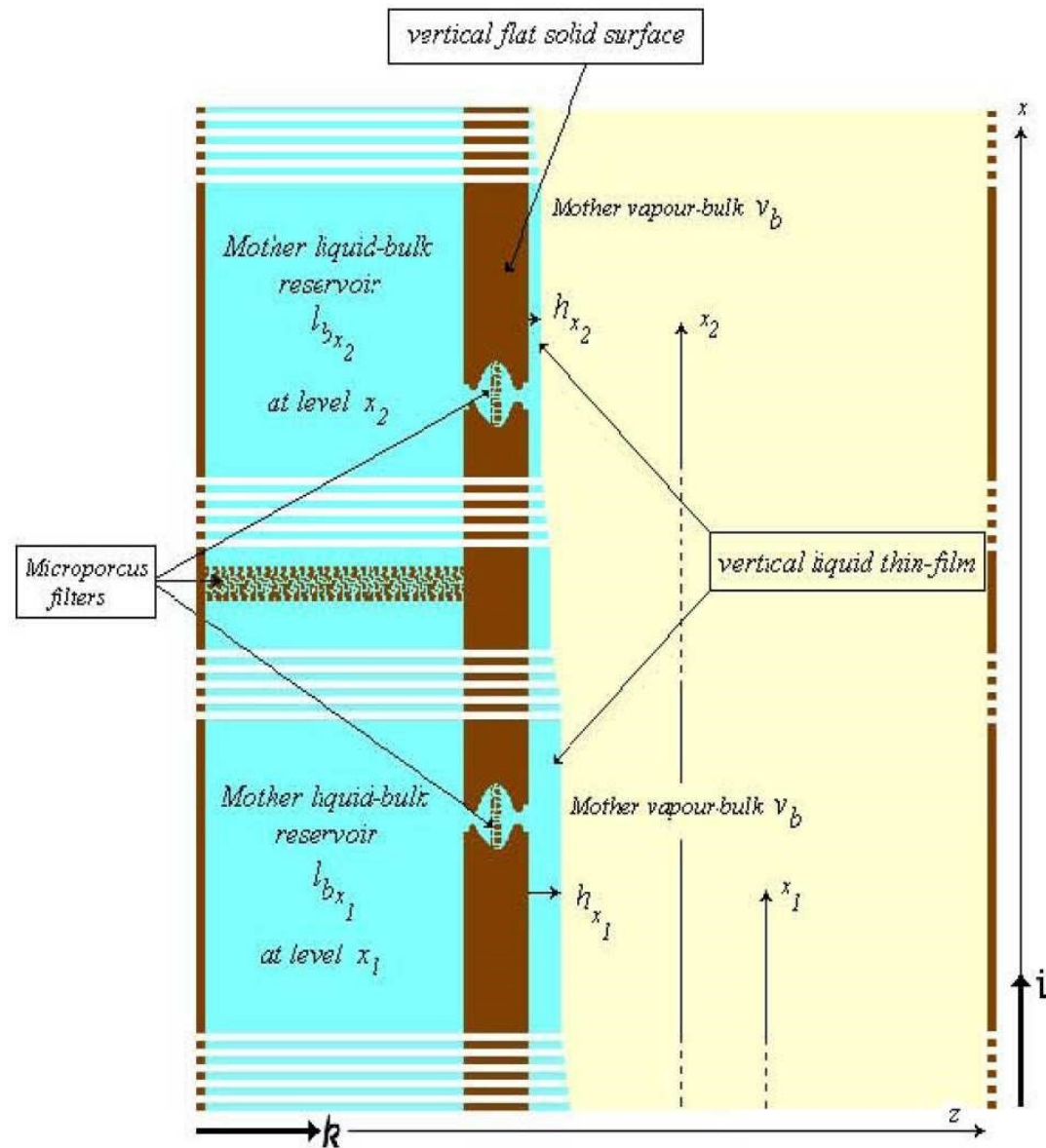


Схема подъема воды по порам ксилемы высоких деревьев



Подъем воды к кроне высоких деревьев происходит за счет поверхностных сил смачивания и из-за испарения воды из листьев или иголок кроны.

При этом сплошного столба воды в порах ксилемы не образуется и водяная пленка находится в контакте с воздухом и водяным паром.

**Живые организмы
знают механику и физику
лучше, чем мы с вами, и умело
пользуются этими знаниями!**

**Изучать движение в живой
природе не только интересно,
но и полезно!**