

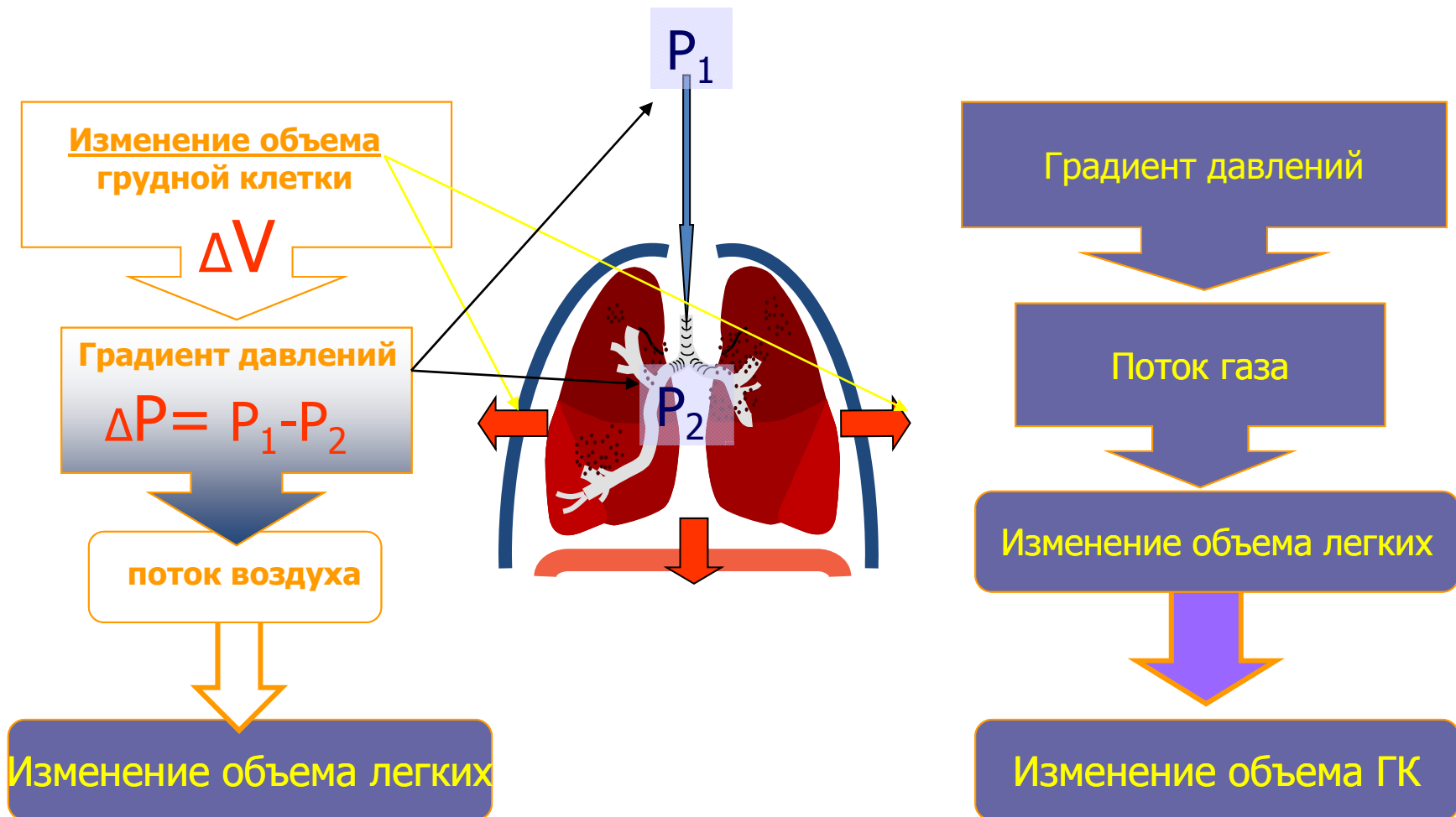
Физиология дыхания в контексте респираторной поддержки и ИВЛ

К.м.н. Фурманчук Д.А.

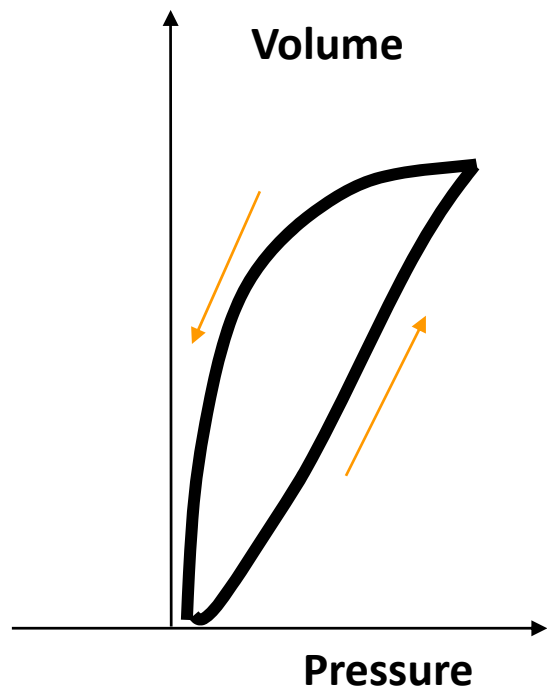
Механизм вентиляции

спонтанное дыхание

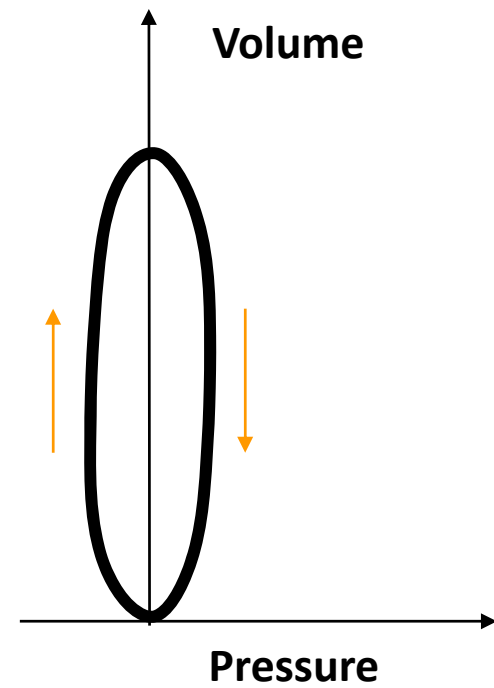
ИВЛ



Механизм вентиляции



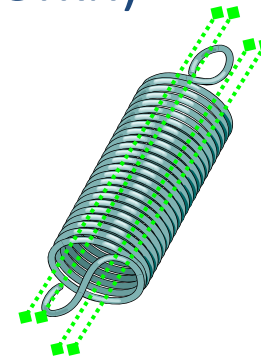
ИВЛ



СПОНТАННОЕ ДЫХАНИЕ

Газообменная зона

- Два типа клеток (пневмоциты/альвеолоциты) :
 - 1. I типа – сквамозные 10%, тонкие и плоские
 - $2.8 \rightarrow 32 \rightarrow 75-180\text{м}^2$ поверхности
 - газообмен
 - 2. II типа- гранулярные 15%, кубоидальные
 - Синтез сурфактанта
 - Дифференцировка с образованием А I типа
 - Альвеолярные макрофаги (ВМ, фагоцитоз)
- Интерстиций (объем зависит объема грудной клетки)
 - Коллаген+Эластин
 - Лимфатический дренаж \rightarrow ВПВ
- Эндотелий 30%



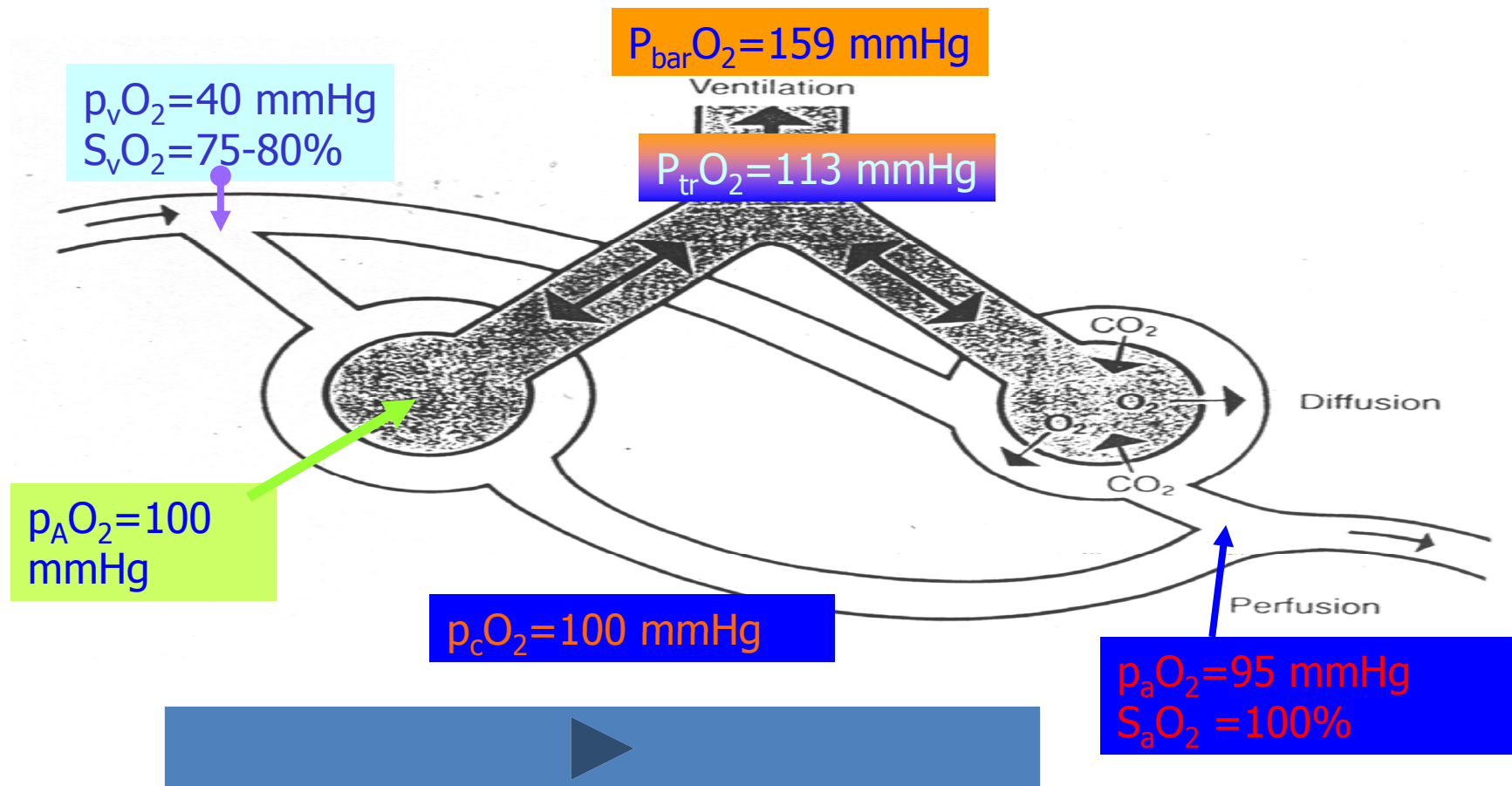
Газообменная зона

Альвеоло-капиллярная мембрана

- Толщина 0,4-0,7 мкм
 - Площадь у взрослого 75 - 180 м² (300 млн альвеол)
 - Площадь у ребенка 8 лет 32 м²
 - Площадь у новорожденного 2,8 м² (20 млн альвеол)
- Время капиллярного транзита эритроцита 0,8 сек
- Общая скорость диффузии газов 25 мл/мин
- Время насыщения Hb кислородом 0,3 сек

Газообменная зона

- Газообмен есть **пассивная** диффузия обусловленная наличием градиента парциального давления газов по обе стороны альвеоло-капиллярной мембраны



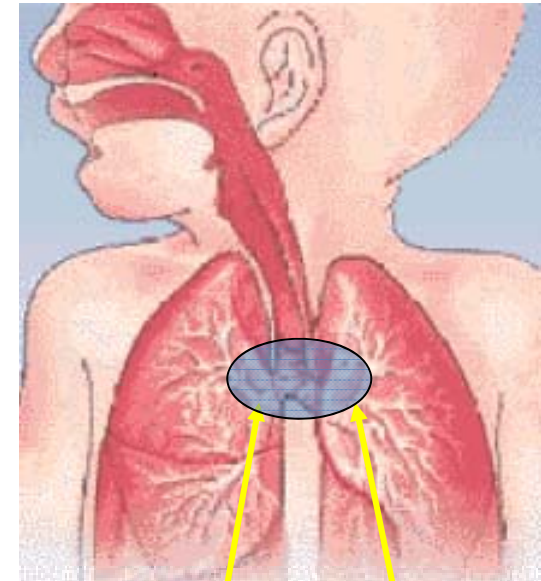
Проводящая зона

- ВДП
 - Нос (фильтр, сенсор, увлажнение и подогрев)
 - Глотка (носо..-рото..-гортано..)
 - Гортань (голос, фильтр увлажнение и подогрев)

↓
Голосовые складки
Подскладочное пространство

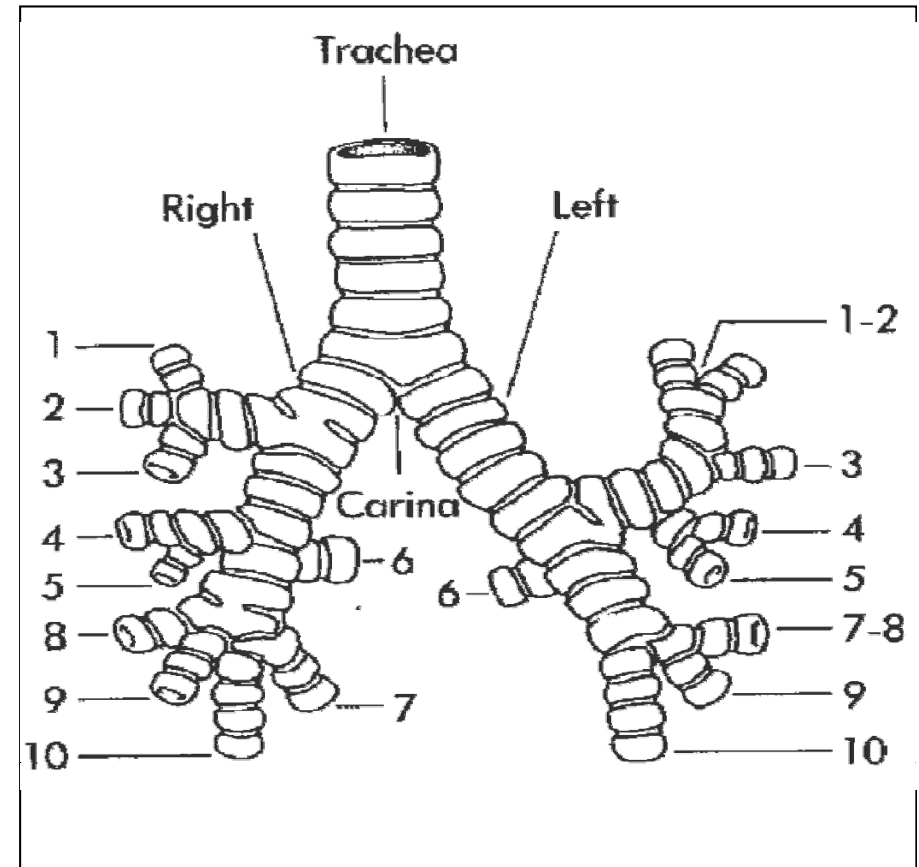
↓
Надгортанник

$T^{\circ}=37^{\circ}\text{C}$, $RH=100\%$



Проводящая зона

- Нижние дыхательные пути
 - Хрящевая основа **присутствует** до 16 порядка ($\text{Ø}=1\text{мм}$)
 - Слизистая оболочка-реснитчатый кубический эпителий
 - Гладкая мускулатура



Проводящая зона

– трахеобронхиальный секрет → ← мокрота

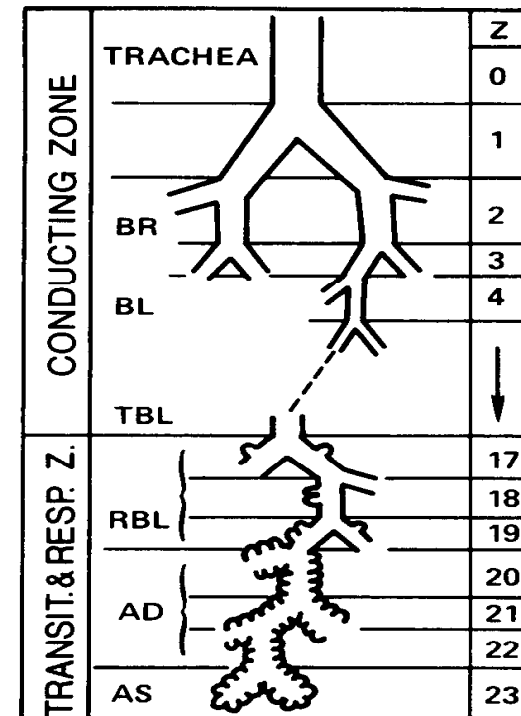
Дренирование секрета в норме

- Мукоцилиарный транспорт
- Кашель

- реологические свойства
- слои
 - » Гель
 - » Золь
- Высыхание секрета → нарушение мукоцилиарного механизма → обструкция
- pH, количество инородных частиц, бактерий, качество газа, клеточный состав

Проводящая зона

- Бронхиолы 17-23 порядок
 - хрящевой основы нет
 - плоский реснитчатый эпителий
 - элементы гладкой мускулатуры
 - участие в газообмене



Влажность газа

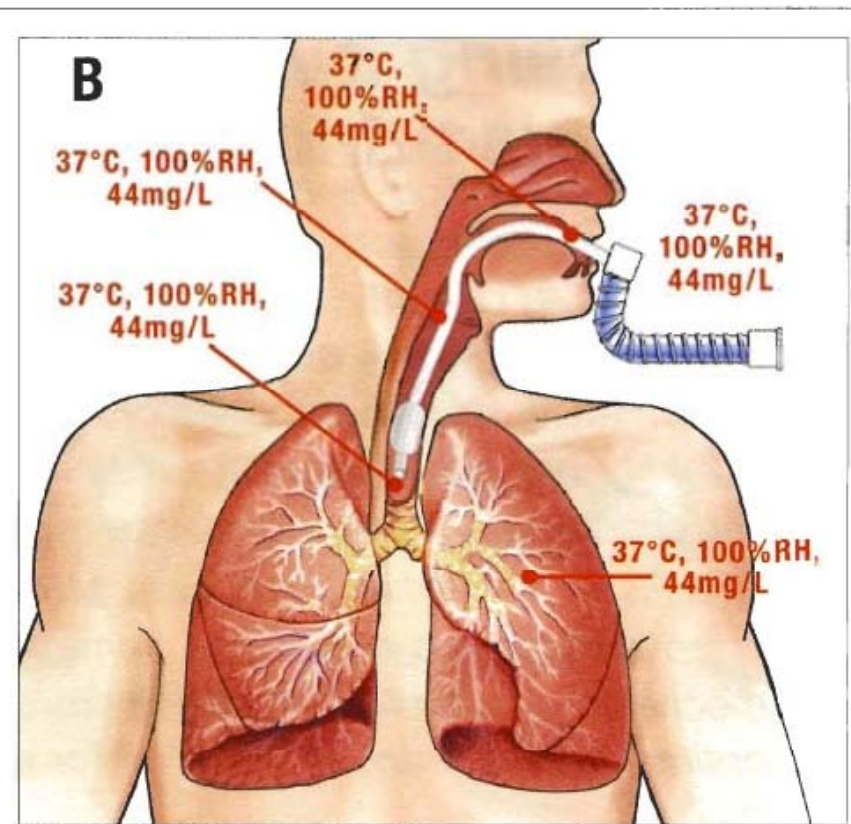
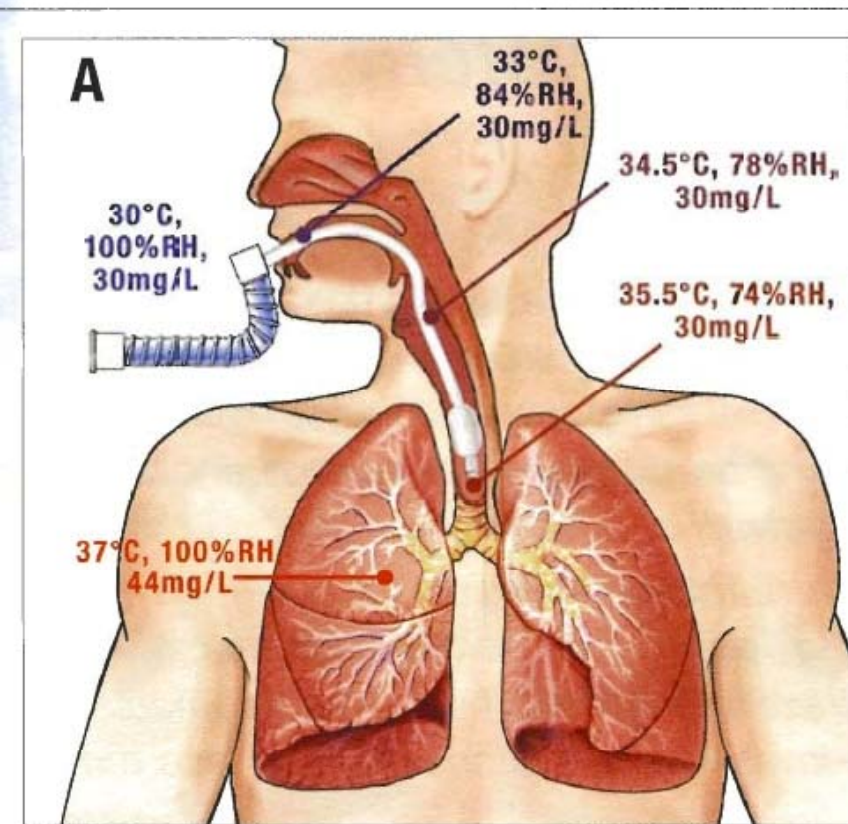
- Количество воды в объеме газа
- Абсолютная (АН - absolute humidity)

$$AH = \frac{\text{Масса воды (мг)}}{\text{Объем газа (л)}} \quad (\text{мг/л})$$

- Относительная влажность (RH – relative humidity)

$$RH = \frac{\text{АН (мг/л)}}{\text{Максимально возможную АН (л)}} \quad 100\%$$

Значение относительной влажности различны при различных температурах (при одной и той же массе воды в одном и том же объеме воздуха)



Отсутствие увлажнения вдыхаемой смеси

- Потери жидкости
- Утрата функции мукоцилиарного транспорта →
- Увеличение $R_{i, ex}$ → ателектазирование
- Глубина повреждения пропорциональна экспозиции

90' дыхания воздухом с влажностью 0% у взрослого человека полностью блокирует мукоцилиарный транспорт на 24 часа

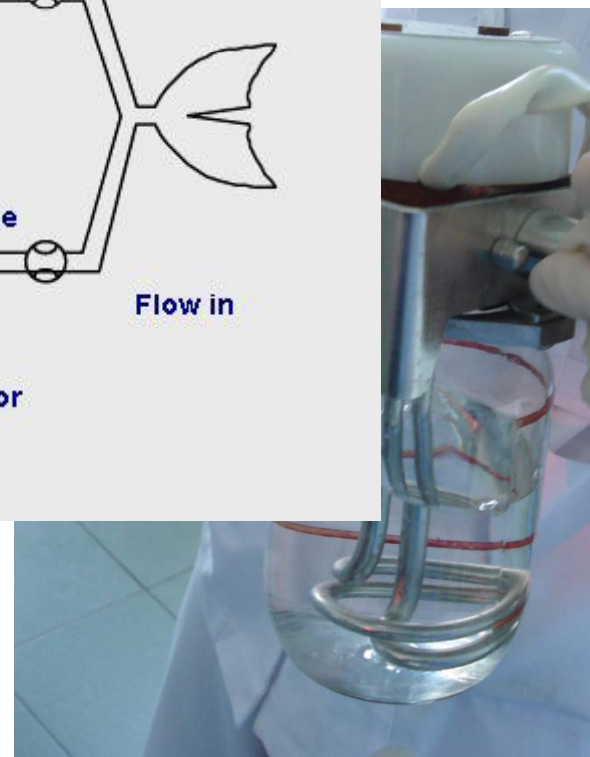
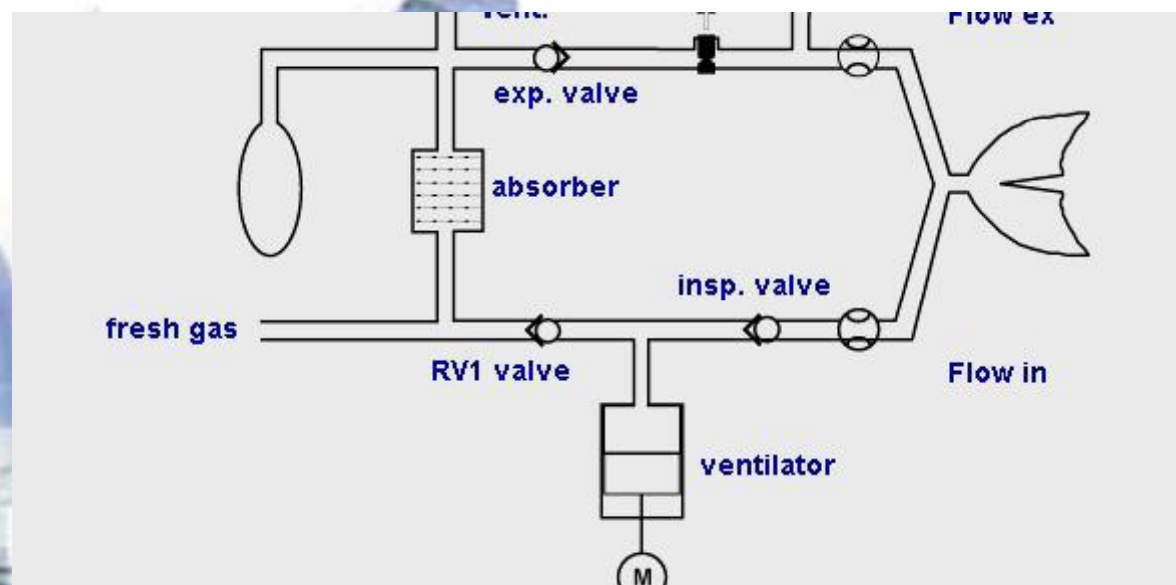
(Lichtiger M, Landa JF; Anesthesiology, 42, 1975)

Увлажнение вдыхаемой смеси

Параметры:

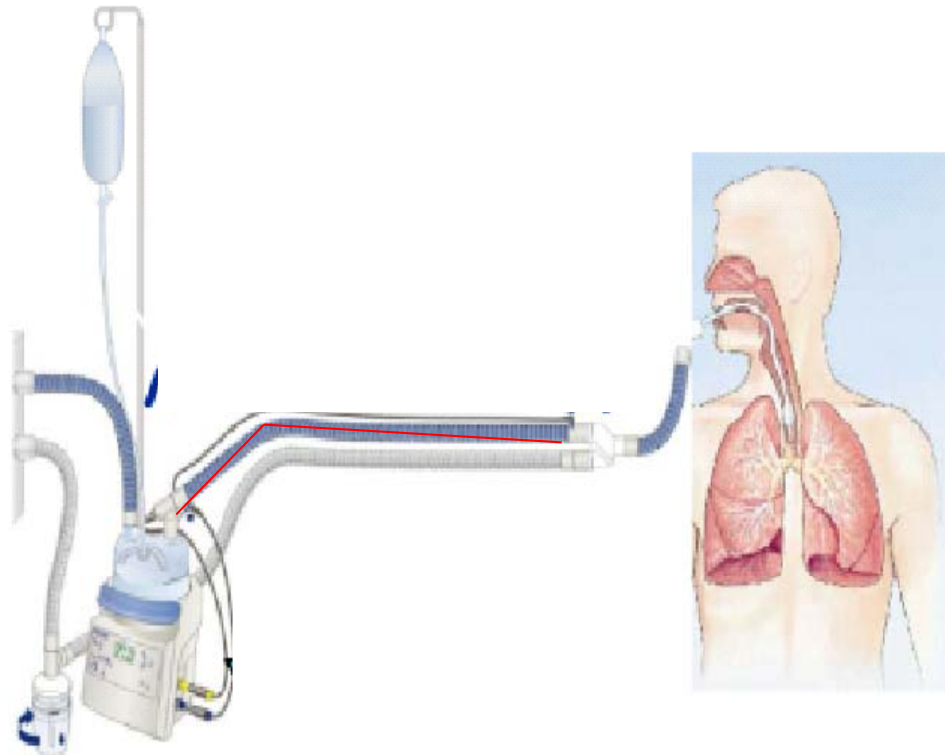
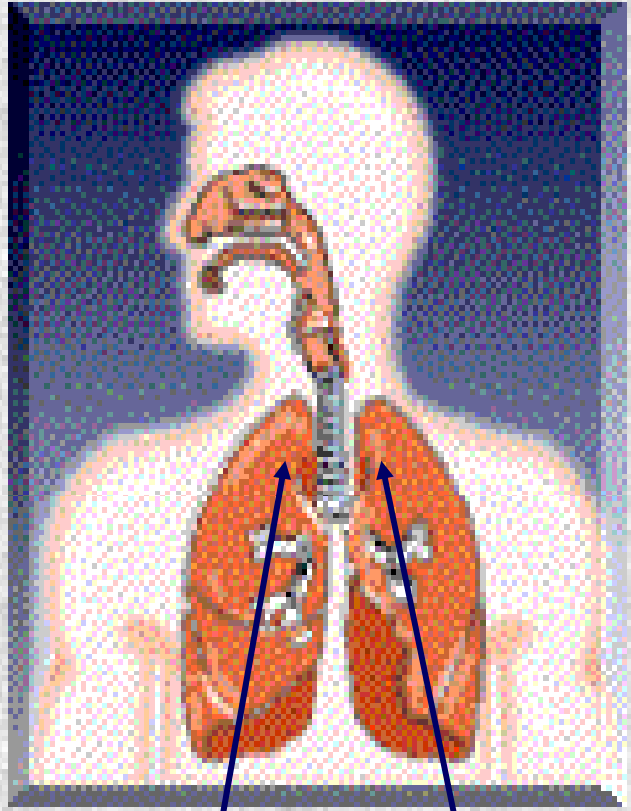
RH=100%

AH=44 г/л



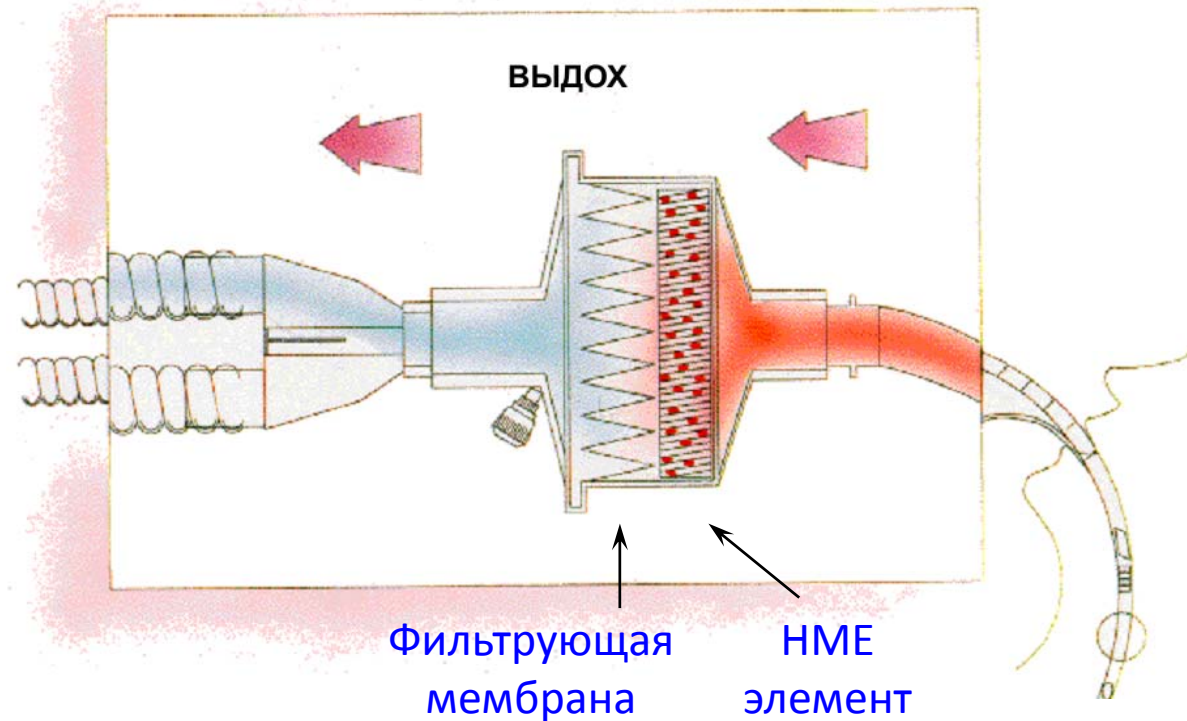
Увлажнение вдыхаемого газа

Вид увлажнителя	Область применения	Примечания
Увлажнитель с холодной водой	O ₂ - терапия	
Увлажнители с подогревом камеры	O ₂ - терапия CPAP Неинвазивная вентиляция (сохранение функции ДП)	Температура на уровне у-обр коннектора 31-32°C Влажность 40-55% Конденсат Проблемы в работе триггера
Увлажнители с подогревом камеры и инспираторной части контура	ИВЛ через ЭТТ	Температура 37°C Влажность 100%
Теплообменники HME аHME	ИВЛ через ЭТТ	Инфекционный контроль Анестезиология Транспортировка Кратковременная ИВЛ



$T^{\circ}=37^{\circ}\text{C}, \text{RH}=100\%$

Фильтр НМЕ (тепловлагообменник)

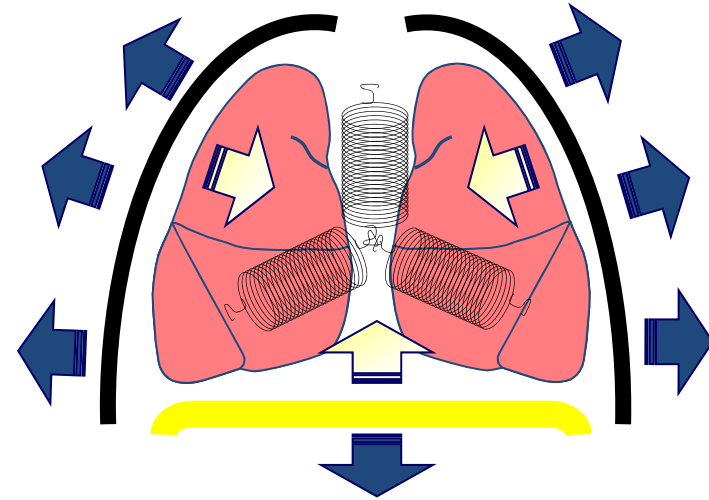


(НМЕ – heat & moisture exchanger)

Материал с низкой сопротивляемостью
и высокой теплоемкостью ($\text{CaCl}_2 + \text{LiCl}_2$)

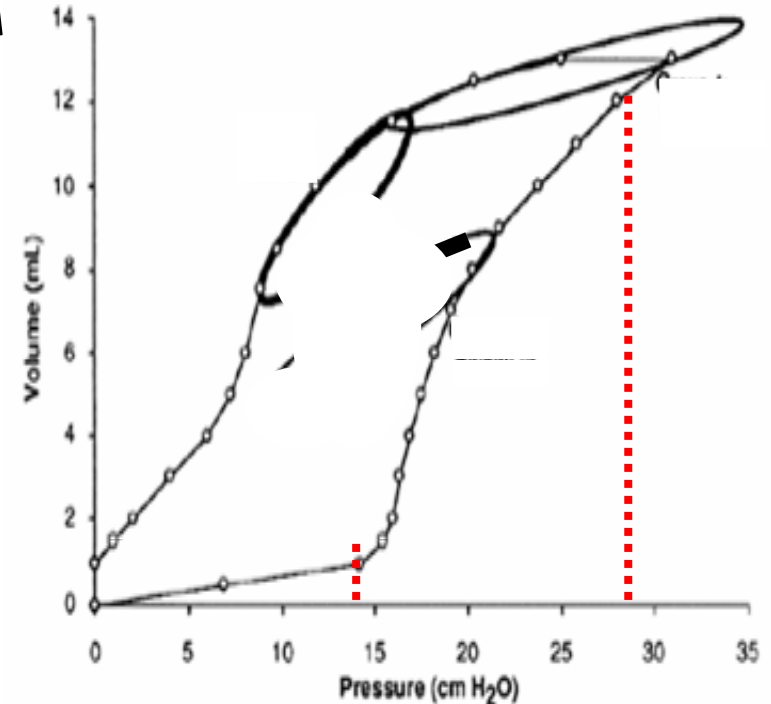
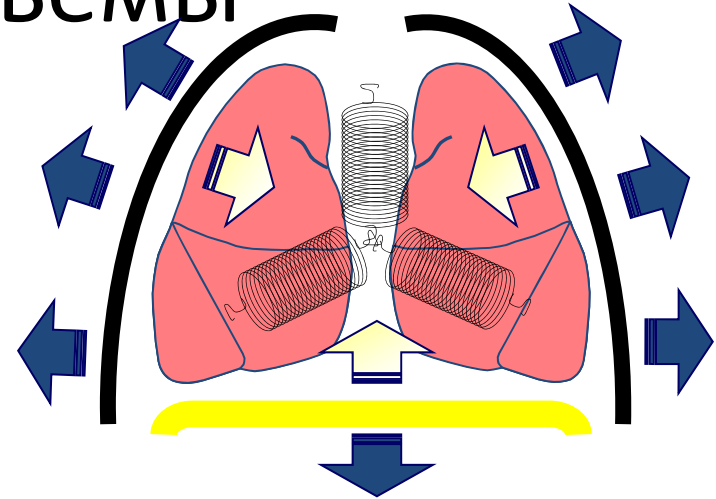
Легочные объемы

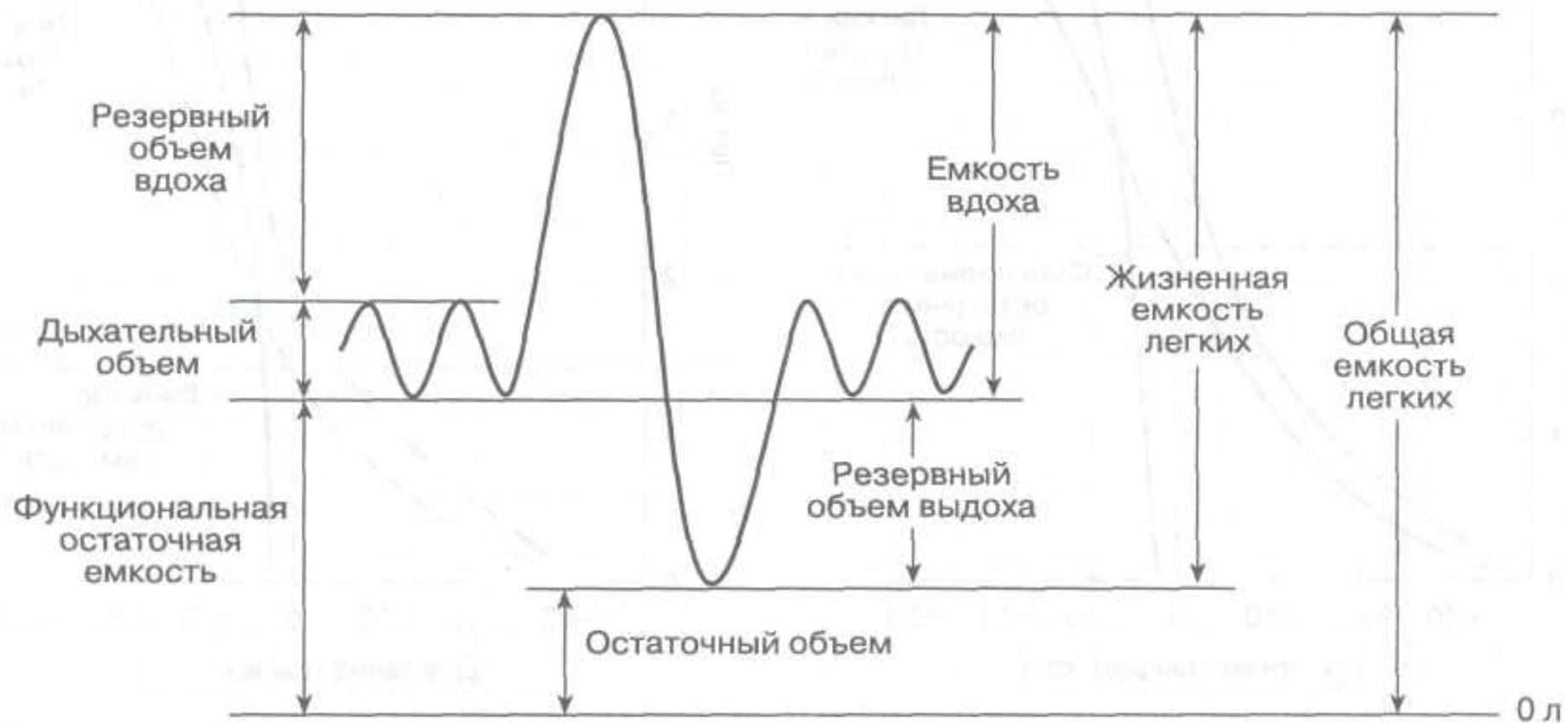
- **ФОЕ** – объем легких в конце спокойного выдоха.
- Факторы, влияющие:
 - Возраст, рост, пол,
 - Положение тела
 - Тонус диафрагмы
 - Давление в брюшной полости
 - Болезни легких
- Новорожденные 8-12 мл/кг
- Дети до 1 года 27-30 мл/кг
- Взрослые 35-40 мл/кг
- **Физиологическое значение:** диффузия газов через альвеоло-капиллярную мембрану продолжается в фазу выдоха (легочный кровоток, ПЖ)



Легочные объемы

- **ЖЕЛ** = взрослые 60-70 мл/кг, дети до 1 года 35-40 мл/кг
новорожденные 27-30 мл/кг
- Превышение **ЖЕЛ** сопровождается снижением растяжимости и риском разрыва
- **Дыхательный объем (V_t)** 5-7 мл/кг





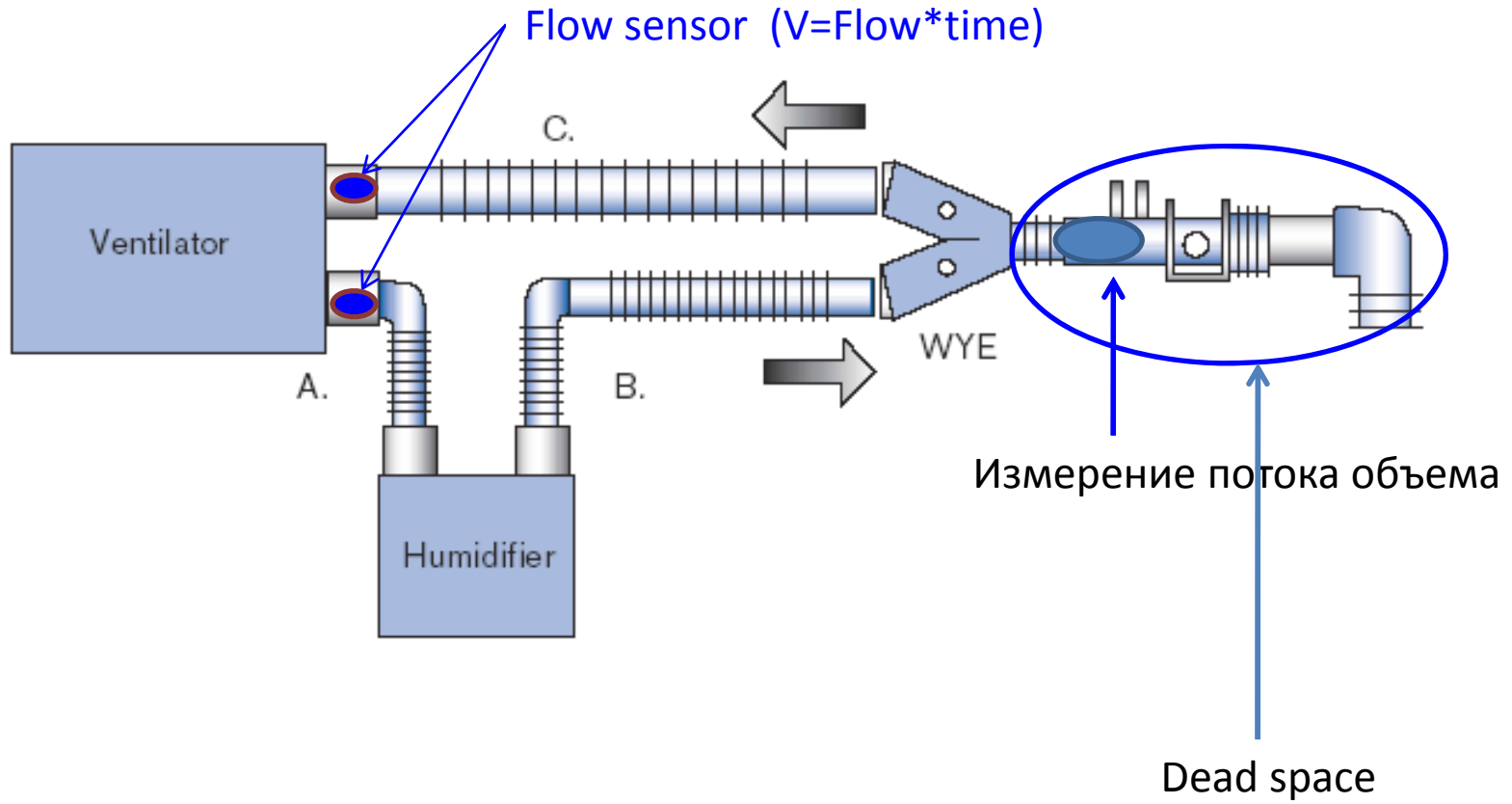
Альвеолярная вентиляция и мертвое пространство

- Альвеолярная вентиляция =
минутная вентиляция - вентиляция МП
- Мертвое пространство (МП, dead space)
 - Анатомическое = объем проводящей зоны, 2 мл/кг;
 - Альвеолярное = объем газа, вентилирующий
неперфузируемые альвеолы;
 - Механическое создаваемое за счет контура аппарата и
искусственных дыхательных путей

Механическое мертвое пространство



Дыхательный контур



«Проксимальное» измерение потока-объема



- Точное измерение объема на вдохе и выдохе,
- Измерение и → возможность компенсировать утечки

- ✶ Уязвимость к присутствию мокроты и конденсата
- ✶ Дополнительное мертвое пространство



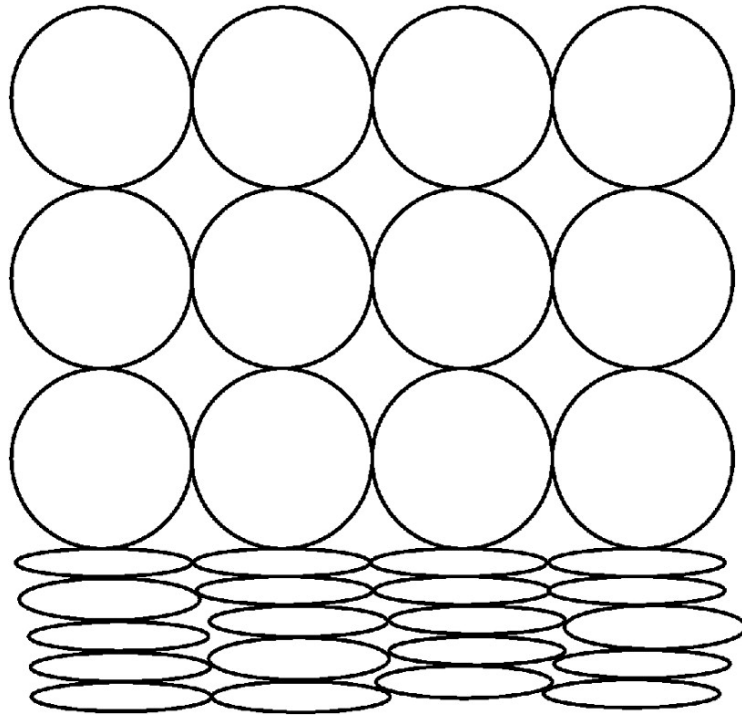


Влияние гравитации на распределение дыхательного объема

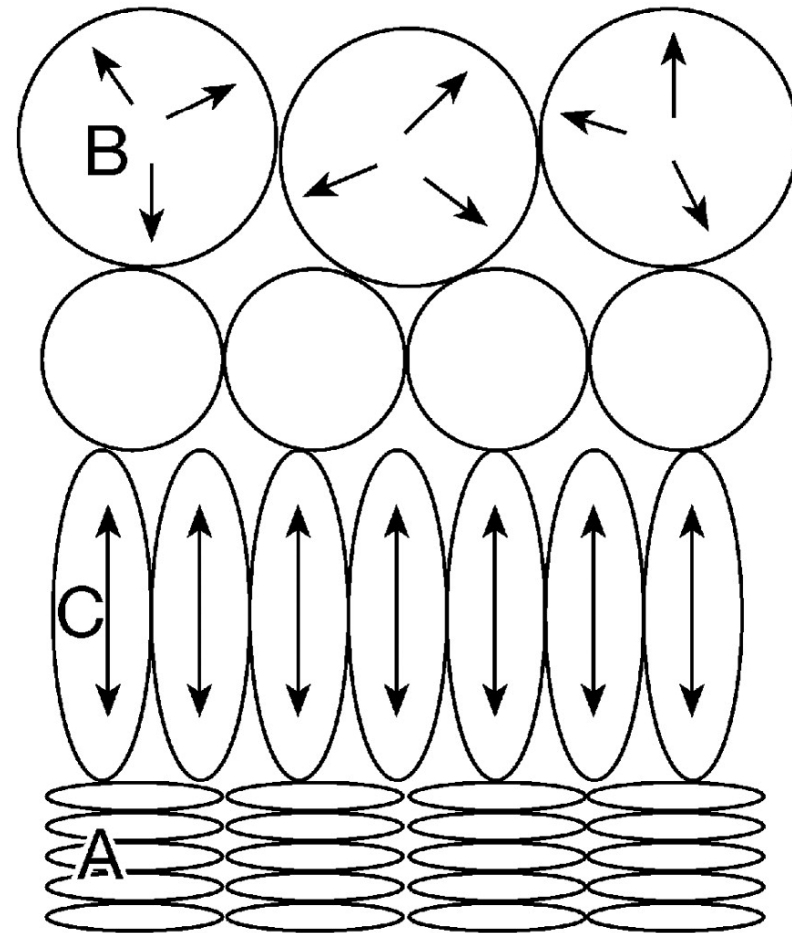
- Увеличение плеврального давления → снижение альвеолярного объема
- «Зависимые/независимые» регионы легких
- Преимущественное распределение дыхательного объема в «зависимые» регионы



Конец выдоха

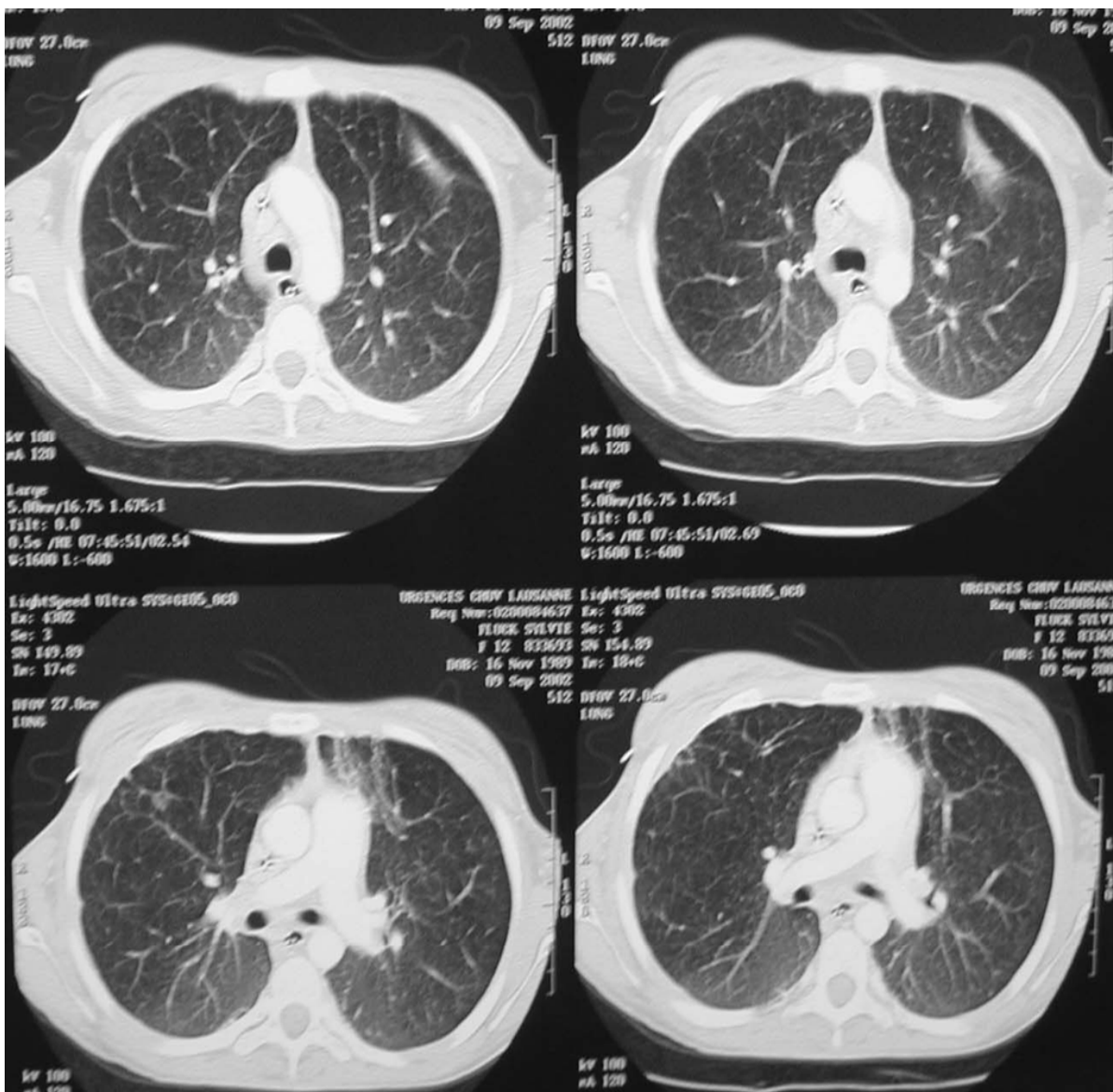


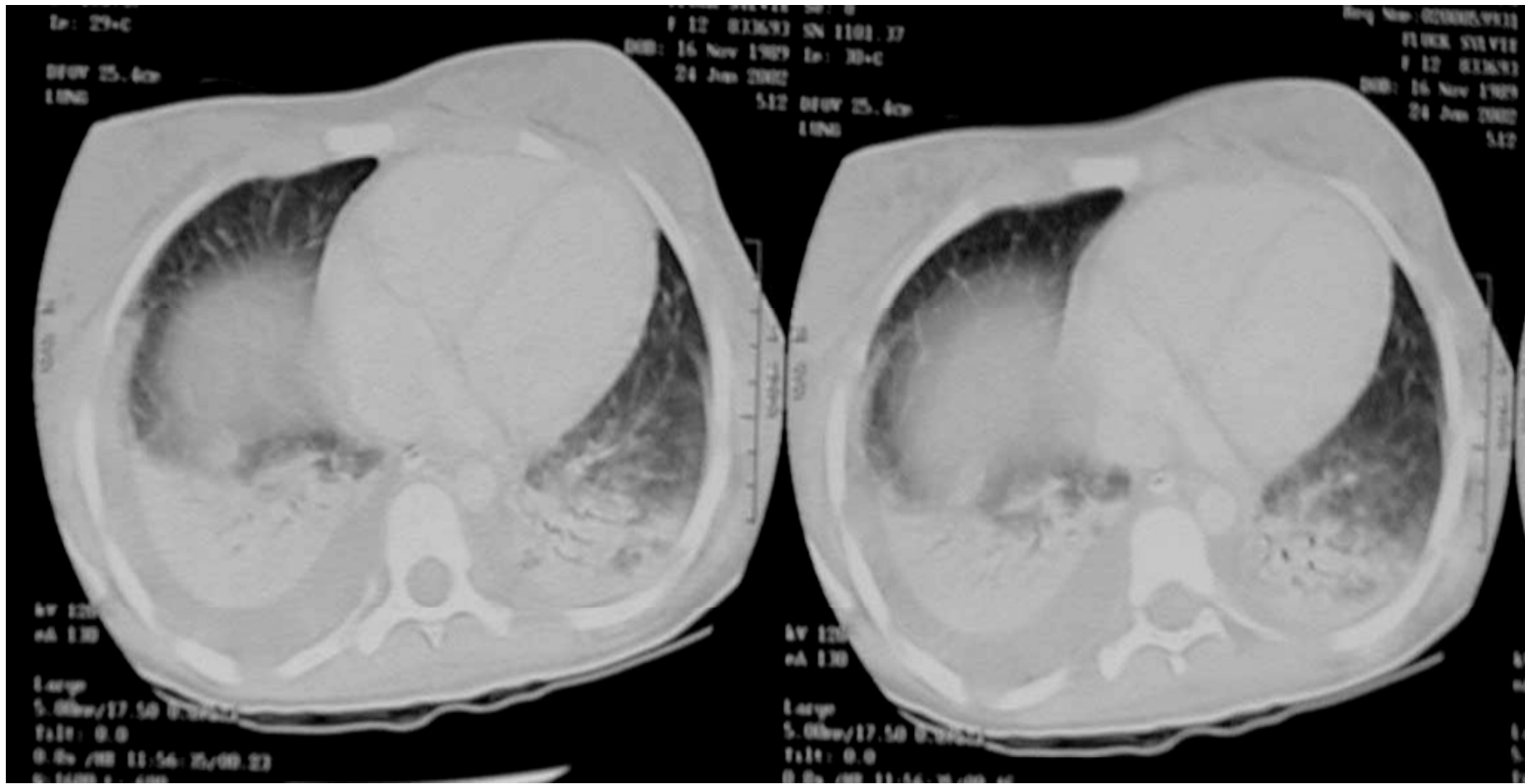
Конец вдоха

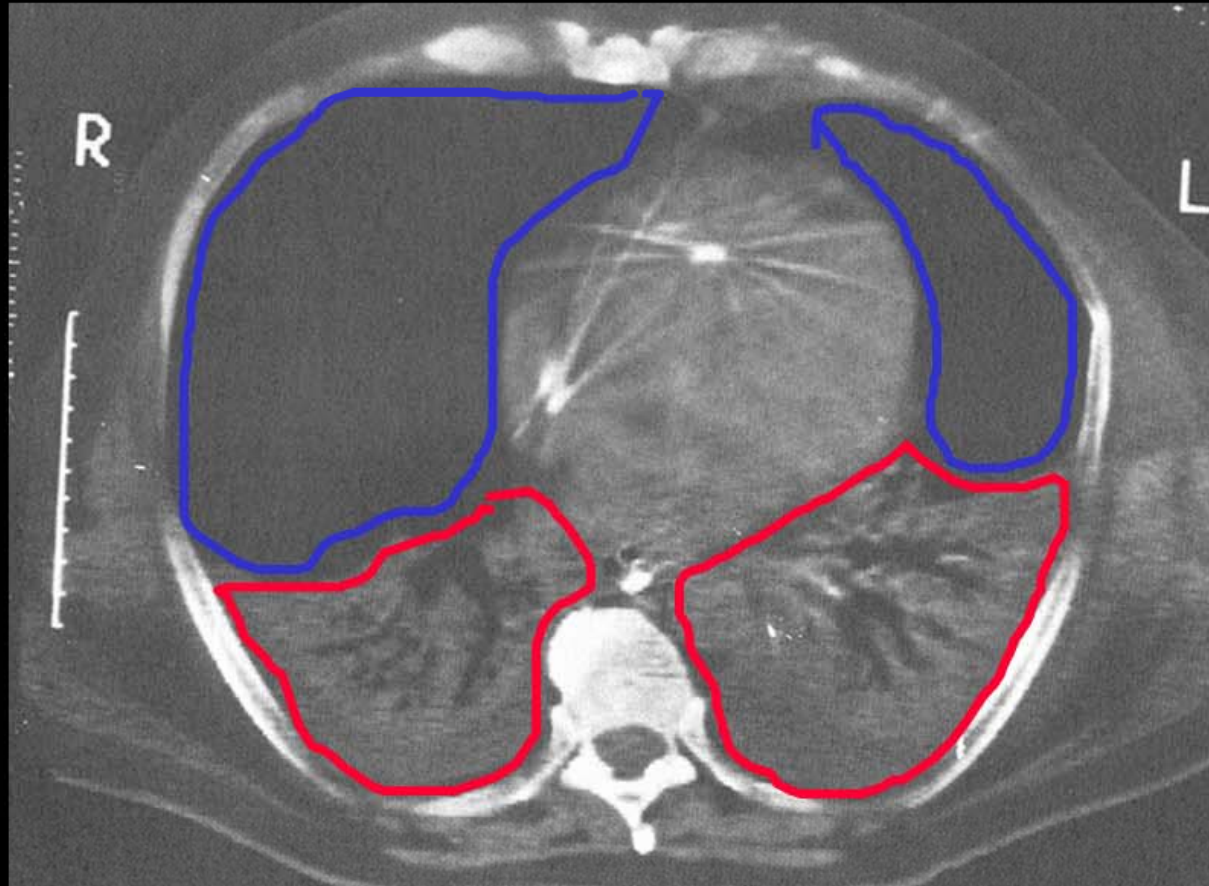


Moloney E D , Griffiths M J D Br. J. Anaesth. 2004;92:261-270
The Board of Management and Trustees of the British Journal of Anaesthesia

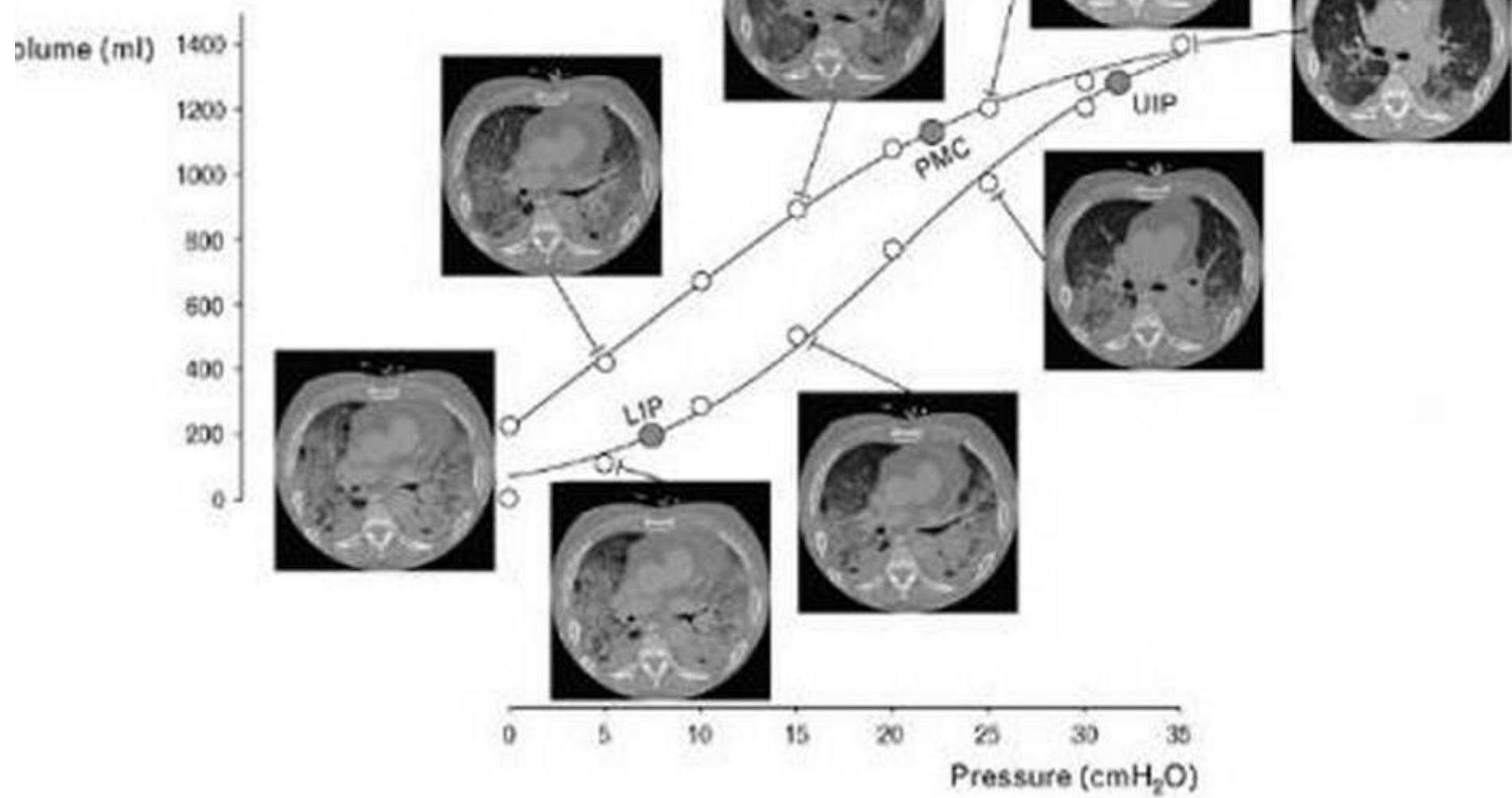
Влияние гравитации на распределение дыхательного объема







Tobin, M. J. N Engl J Med 2001;344:1986-1996



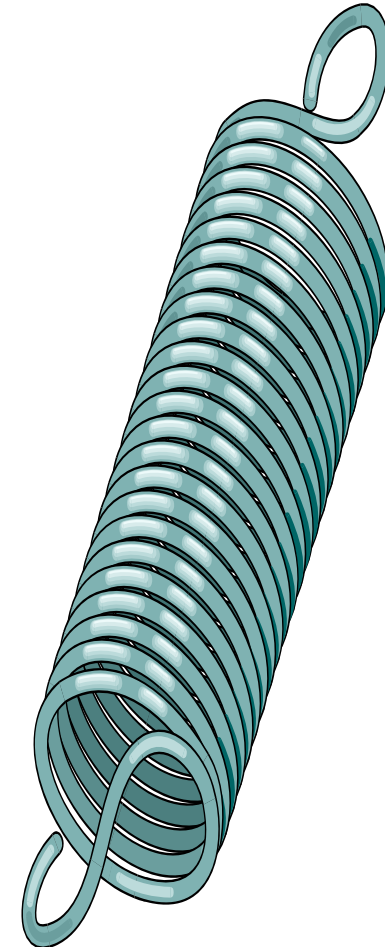
Негравитационные детерминанты дыхательного объема

- Податливость (compliance)
- Сопротивляемость (resistance)
- Константа времени (time constant)

эластическое сопротивление

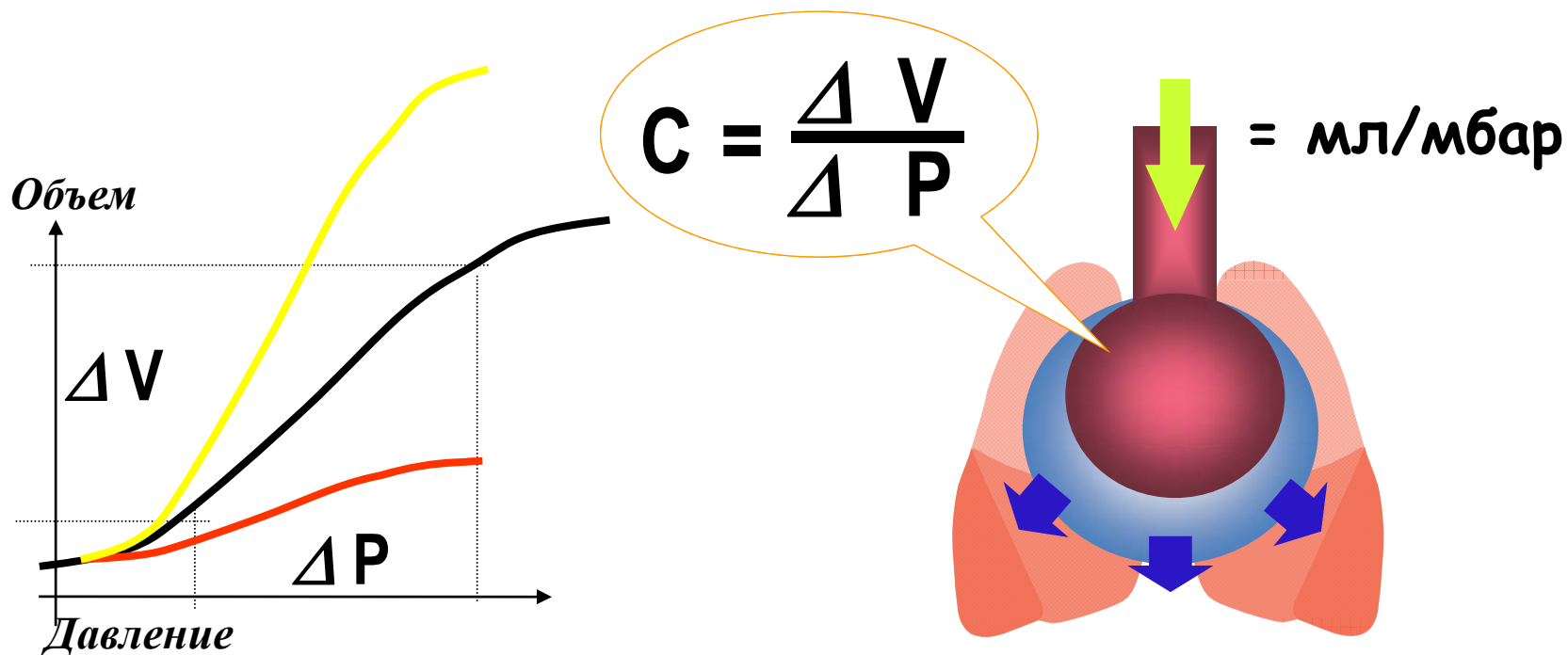
Compliance, податливость

- Мера растяжимости дыхательной системы (легкие, грудная клетка, дыхательный контур)
- Величина, описывающая соотношение между определенным **изменением объема и давлением**, необходимым для достижения этого изменения
- мл/ см H₂O (мл/мбар)



эластическое сопротивление

Комплайнс



Изменение объема =
градиент давлений x Compliance

эластическое сопротивление

Комплајнс

$$C = \frac{\text{изменение объема (мл)}}{\text{изменение давления (см H}_2\text{O)}}$$

Зависит от

- Возраста
- Функционального состояния легких
- Состояния грудной стенки и диафрагмы
- Положения тела, степени мышечной релаксации

эластическое сопротивление

Нормальная величина “С”

Взрослые 50-200 мл/ мбар

Дети 1-10 лет 20 мл/ мбар

Новорожденные 1-7 сутки 1-2 мл/ мбар

Новорожденные 7-28 сутки 5 мл/мбар

Недоношенные с РДС 0.8-1 мл/мбар

Контур аппарата 1 мл/ мбар – 15 мм

2 мл/ мбар



Низкий комплайнс

Легочный

- БГМ
- Мекониальная аспирация
- Отек легких
- Пневмония
- Бронхиолит
- Ателектазы
- Положение на спине

Торакальный

- Пороки развития грудной клетки
- Увеличение объема живота
- Диафрагмальная грыжа

эластическое сопротивление

Динамический комплайнс

$$C_{\text{dyn}} = \frac{\text{Инспираторный объем (мл)}}{\text{Пиковое давление} - \text{ПДКВ(смН}_2\text{О)}}$$

- величина комплайенса, измеренная в условиях присутствия потока газа
- погрешность $\approx 10\text{-}30\text{-}50\%$

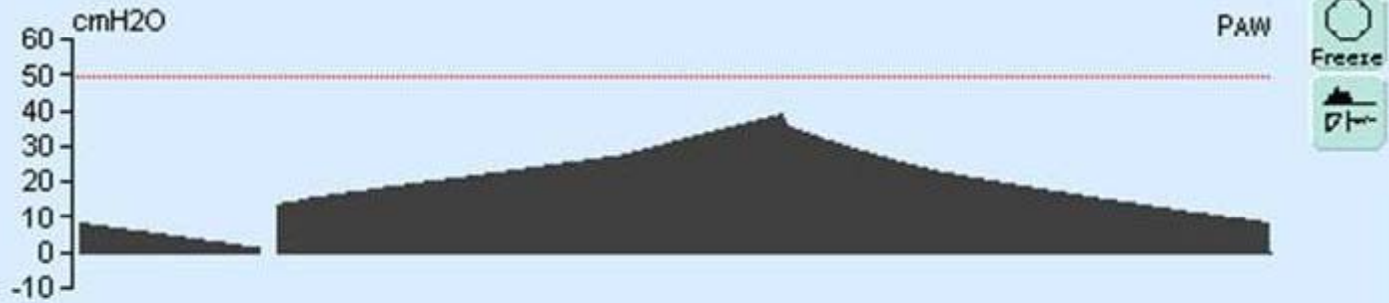
эластическое сопротивление

Статический комплайнс

$$C_{\text{stat}} = \frac{\text{Экспираторный объем (мл)}}{\text{Давление Плато} - \text{ПДКВ(смH}_2\text{O)}}$$

- величина комплайенса, измеренная в условиях экспираторной паузы

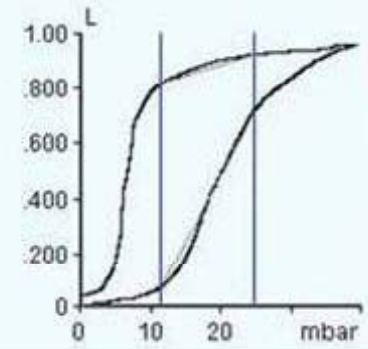
Patient ? Alarm limit ?



Special Procedure

Additional Function Diagnostics Low Flow PV-Loop

	Cursor 1		Cursor 2	
insp.	P_{AW} 12	C_{rtat} 50.9	P_{AW} 25	V_{Ti} .731
	V_{Ti} .069		V_{Ti} .731	
exp.	P_{AW} 12	C_{rtat} 8.5	P_{AW} 25	V_{Te} .931
	V_{Te} .821		V_{Te} .931	
Date	14.07.04		Time 15:26	



Info
Procedure
Analysis

Resistance/сопротивление



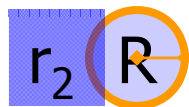
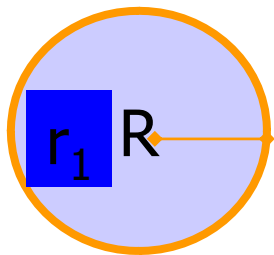
- Сопротивление [R], создаваемое за счет трения молекул газа при о ДП прохождении газа к альвеолам измеряется в $\text{см H}_2\text{O} / (\text{литр} / \text{секунду})$
- Зависит от потока и увеличивается с увеличением потока газа

Resistance/сопротивление

$$R \text{ (мбар/л/сек)} = \frac{\Delta P}{\text{Flow (л/сек)}}$$

Уравнение Hagen-Poiseulle

$$\text{Flow} = \frac{\Delta P \times \pi \times r^4}{8 \times L \times \eta} \Rightarrow R = \frac{1}{r^4}$$



$$r_1 = 2 r_2 \rightarrow R_2 = 16 R_1$$

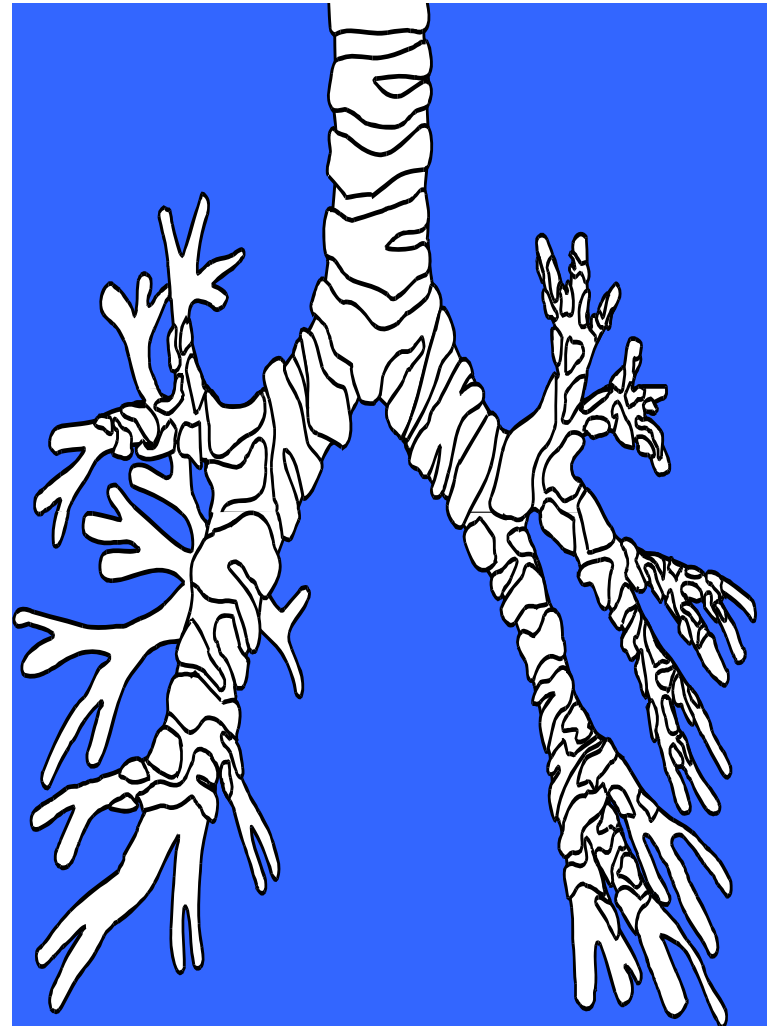


неэластическое сопротивление

Сопротивление

Зависит от свойств
дыхательных путей

- Длина
- Диаметр
- Особенности деления бронхов
и их поверхностных
характеристик
- Потока
(ламинарный/турбулентный)
- Свойств газа (вязкость)



Факторы, влияющие на сопротивление

Патологические

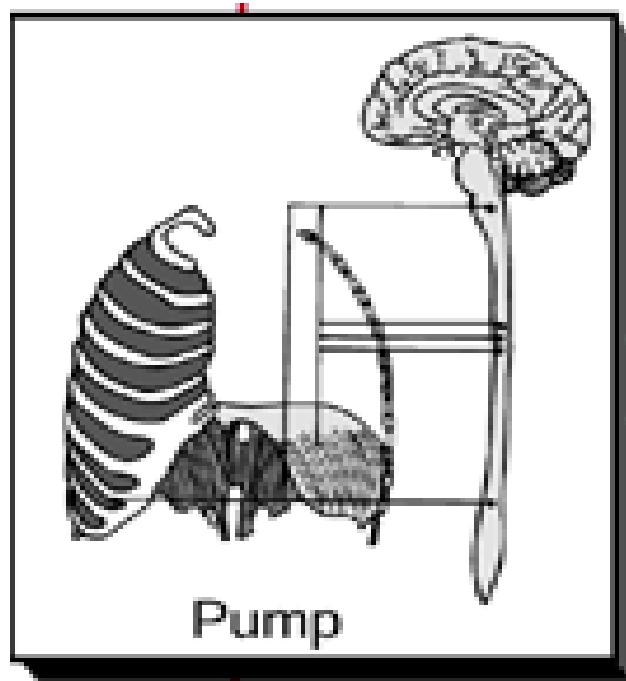
- Бронхоспазм
- Эмфизема
- Обструкция инородным телом
- Избыточная секреция
- Трахеомалация
- Отек слизистой
- Ненормальные анатомические взаимоотношения структур ДП

Механические

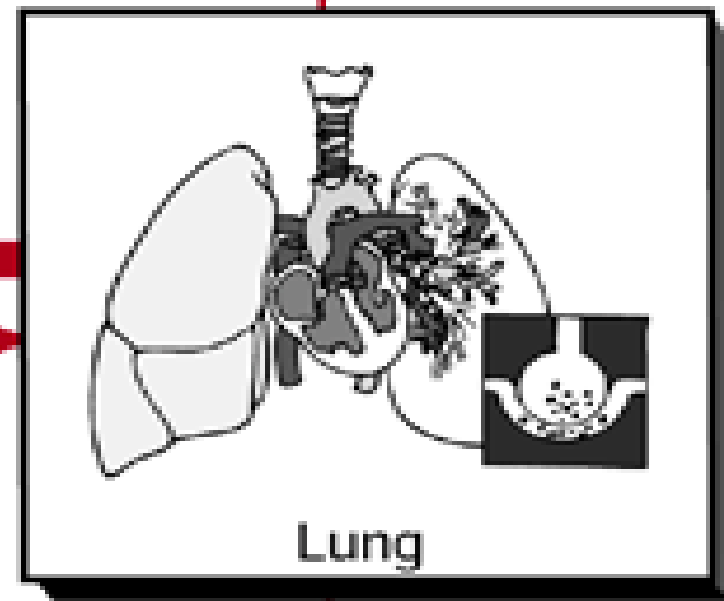
- Бак. фильтры
- Размер ЭТТ
- Величина инспираторного потока
- Конденсация воды в контуре
- Качество экспираторного клапана

Газообмен

Вентиляция



Оксигенация



Элиминация CO_2

CO_2

Транспорт O_2

O_2



Выбор параметров ИВЛ

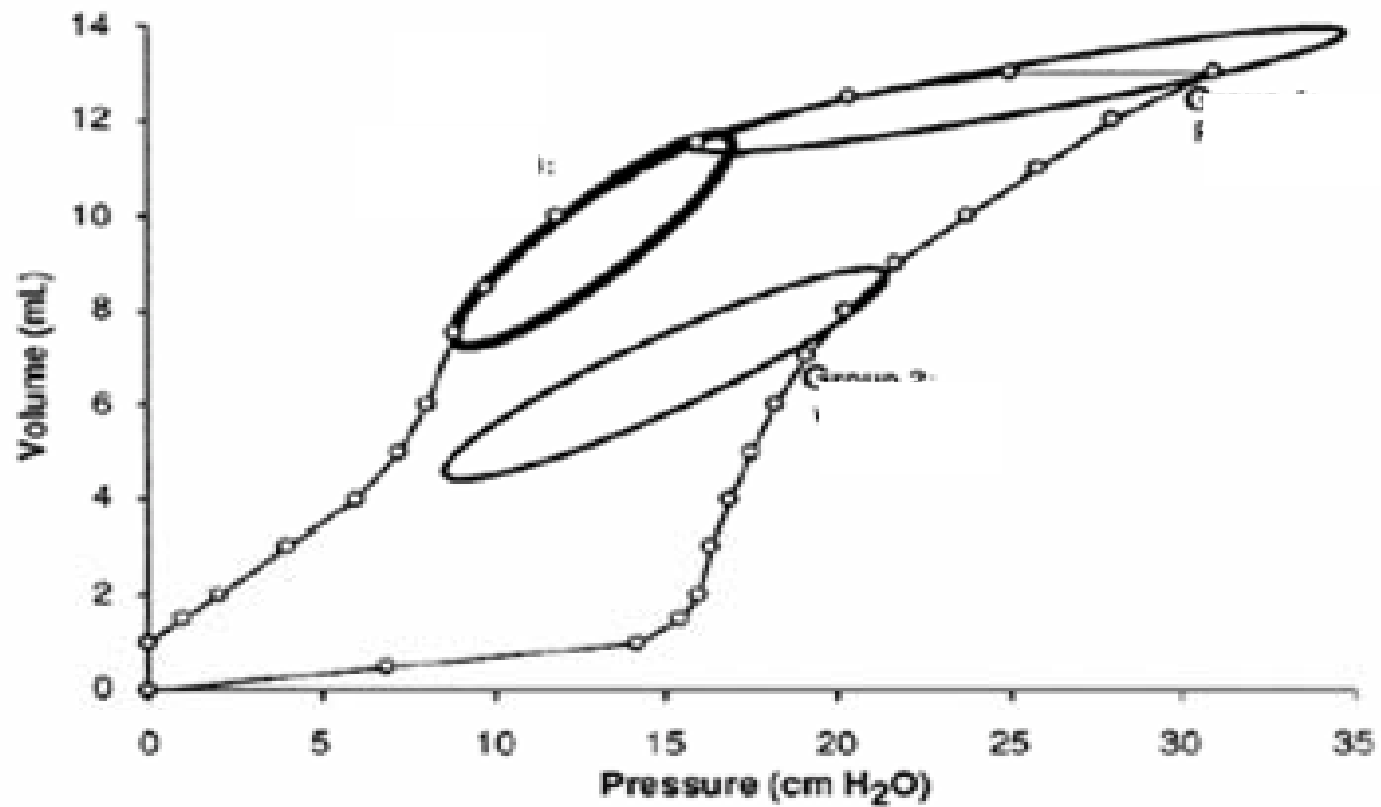
Инструменты для
улучшения оксигенации

- PEEP
- P_{in}
- T_i
- FiO₂

Инструменты для
улучшения
вентиляции

- T_v
- Freq
- T_{ex}

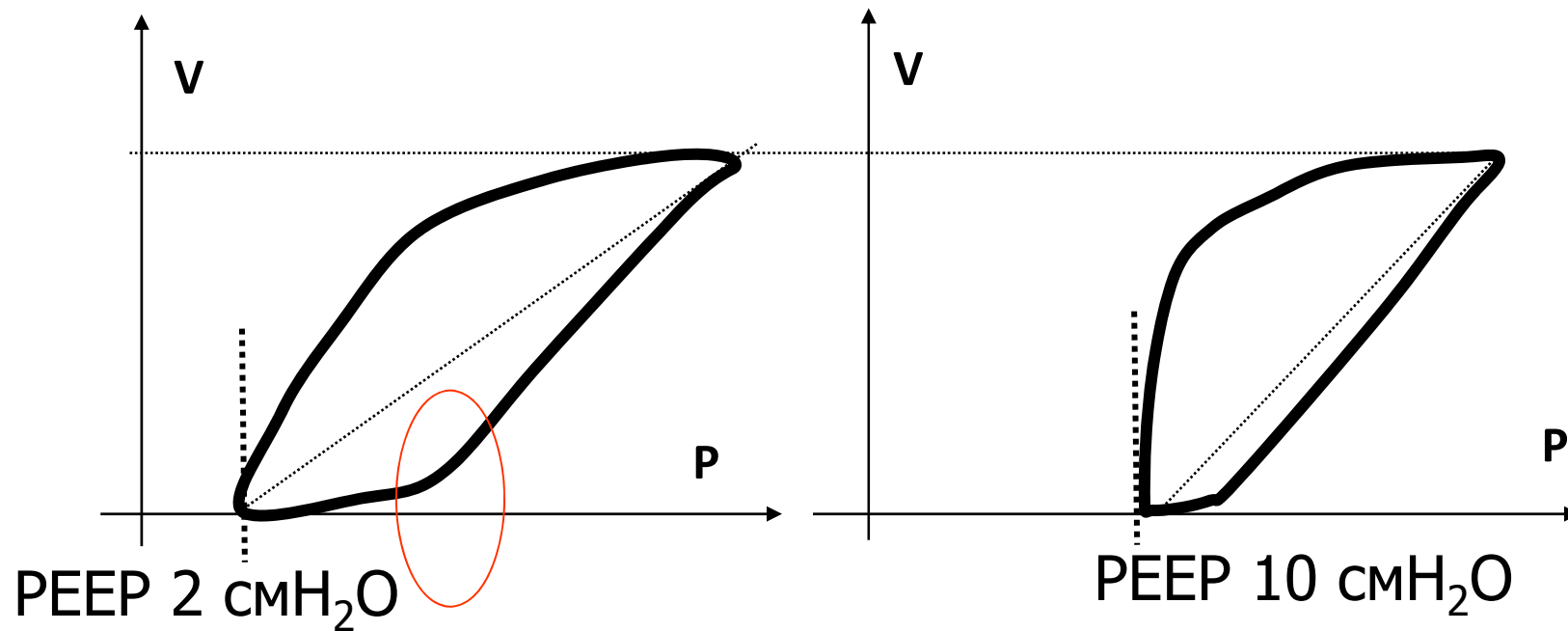
Выбор уровня РЕЕР



Super-syringe method

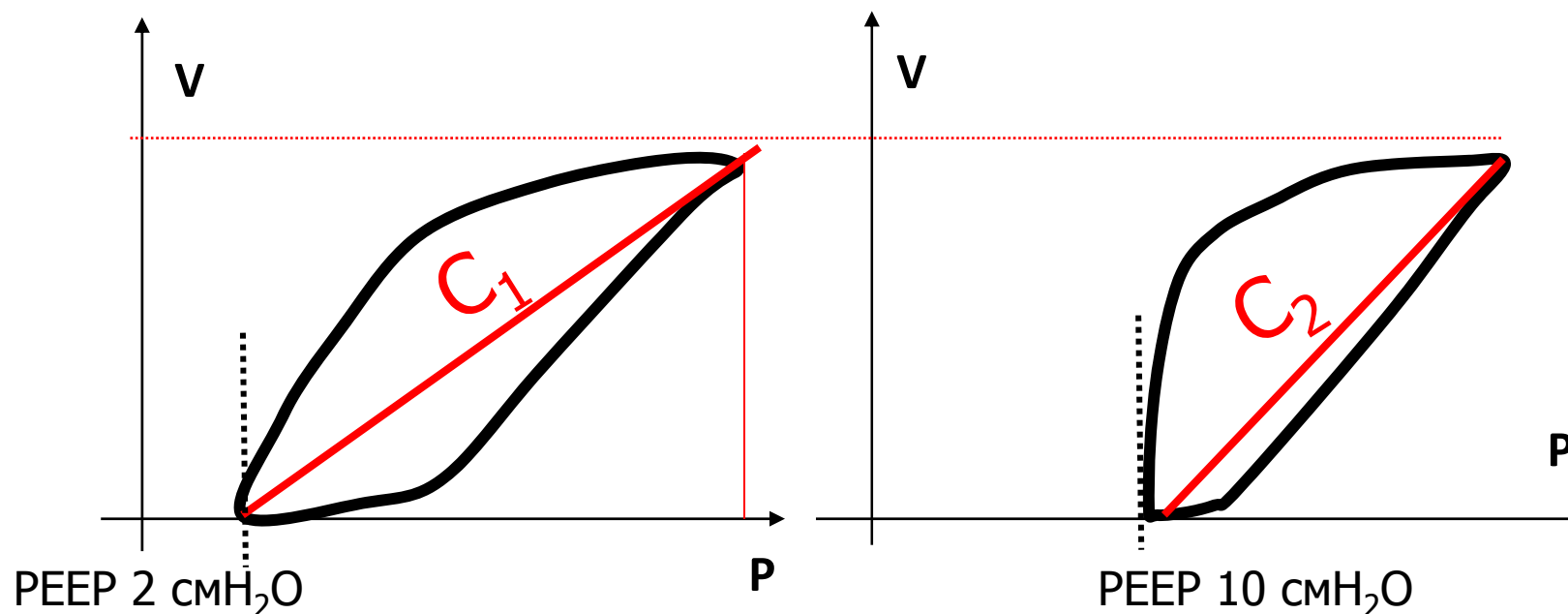
11.11.2011

Выбор уровня РЕЕР



При рестриктивных состояниях оптимальный уровень РЕЕР находится на уровне нижней точки открытия (**Lower Inflection Point**)

Выбор уровня РЕЕР

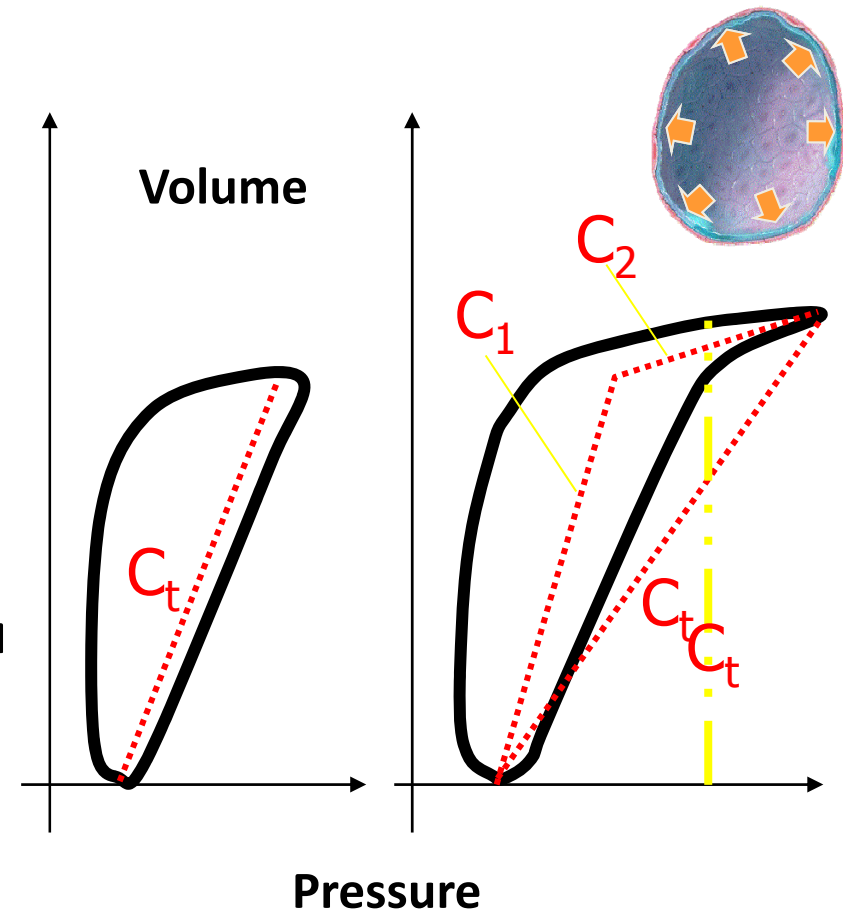


Best PEEP – уровень ПДКВ, обеспечивающий:

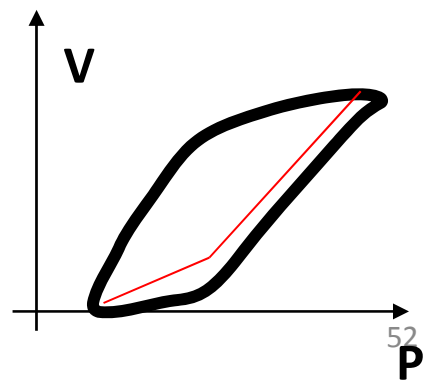
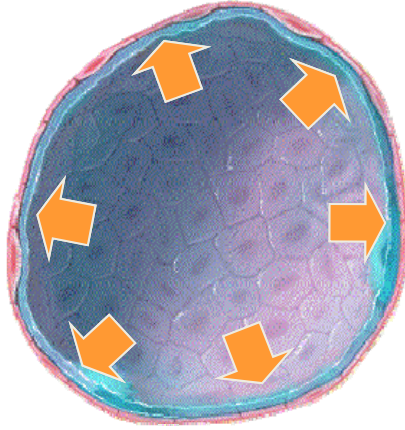
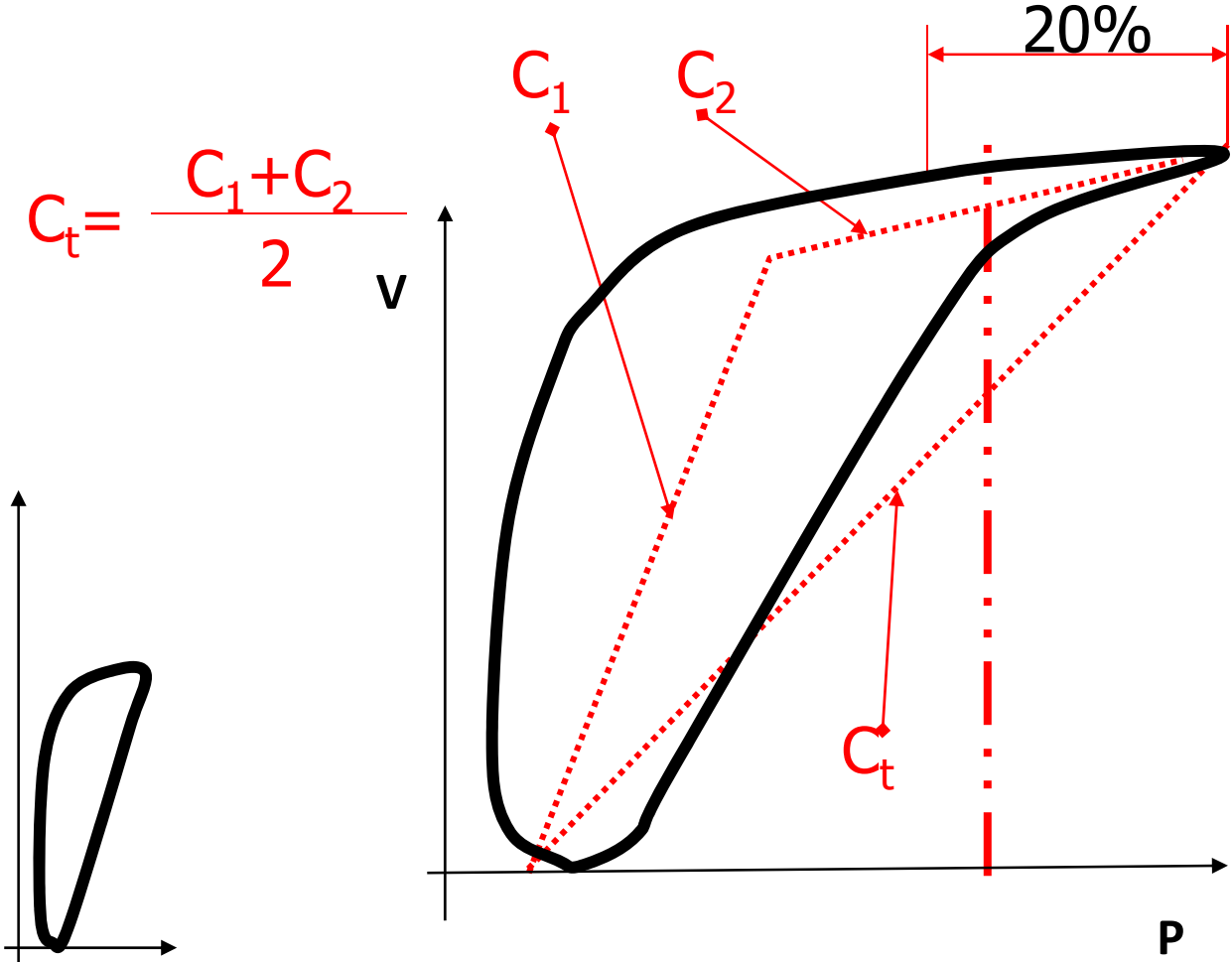
- Максимальную величину комплайенса
- Наилучший уровень оксигенации при наименьшем значении FiO₂

Перераздувание альвеол

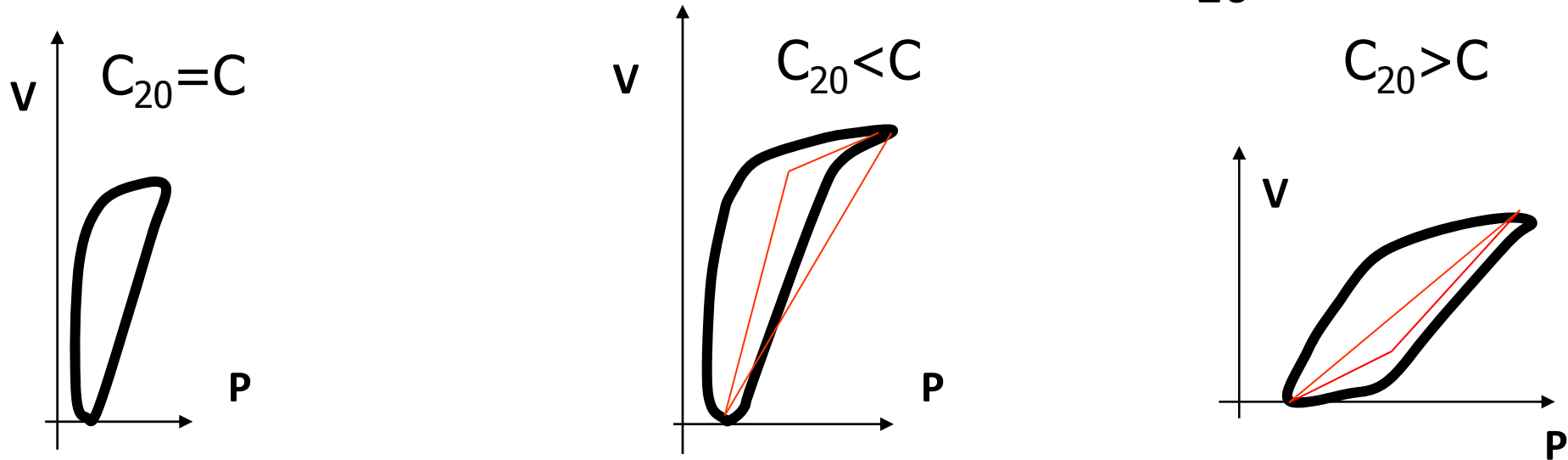
- Перераздувание имеет место когда лимит объема для легкого или его компонентов превышен
- Когда в конце вдоха снижается compliance
- Когда на петле V/P в конце вдоха наблюдается «клюв»



Перераздувание альвеол и C_{20}/C



Перераздувание альвеол и C_{20}/C



$$C_{20} = C \rightarrow C_{20}/C = 1$$

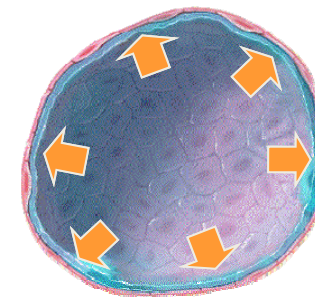
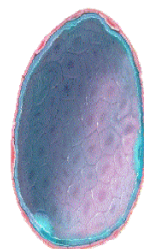
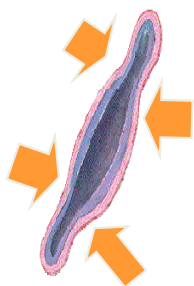
$$C_{20} < C \rightarrow C_{20}/C < 1 \rightarrow \text{возможно перераздувание}$$

$$C_{20} > C \rightarrow C_{20}/C > 1 \rightarrow \text{возможно ателектазирование}$$

Вентилятор-индуцированное повреждение легких (VILI)*

1. Ателектазирование

Повторяющийся альвеолярный коллапс и открытие (хлопанье) «недораскрытых» альвеол



3. Волюмтравма:

Нарушение выдоха, обусловленное обструкцией → аутоPEEP → перерастяжение

4. Биотравма:

Аутоповреждение медиаторами воспаления

Экспрессия генов ответственных за апоптоз

**Dreyfuss: J Appl Physiol 1992*

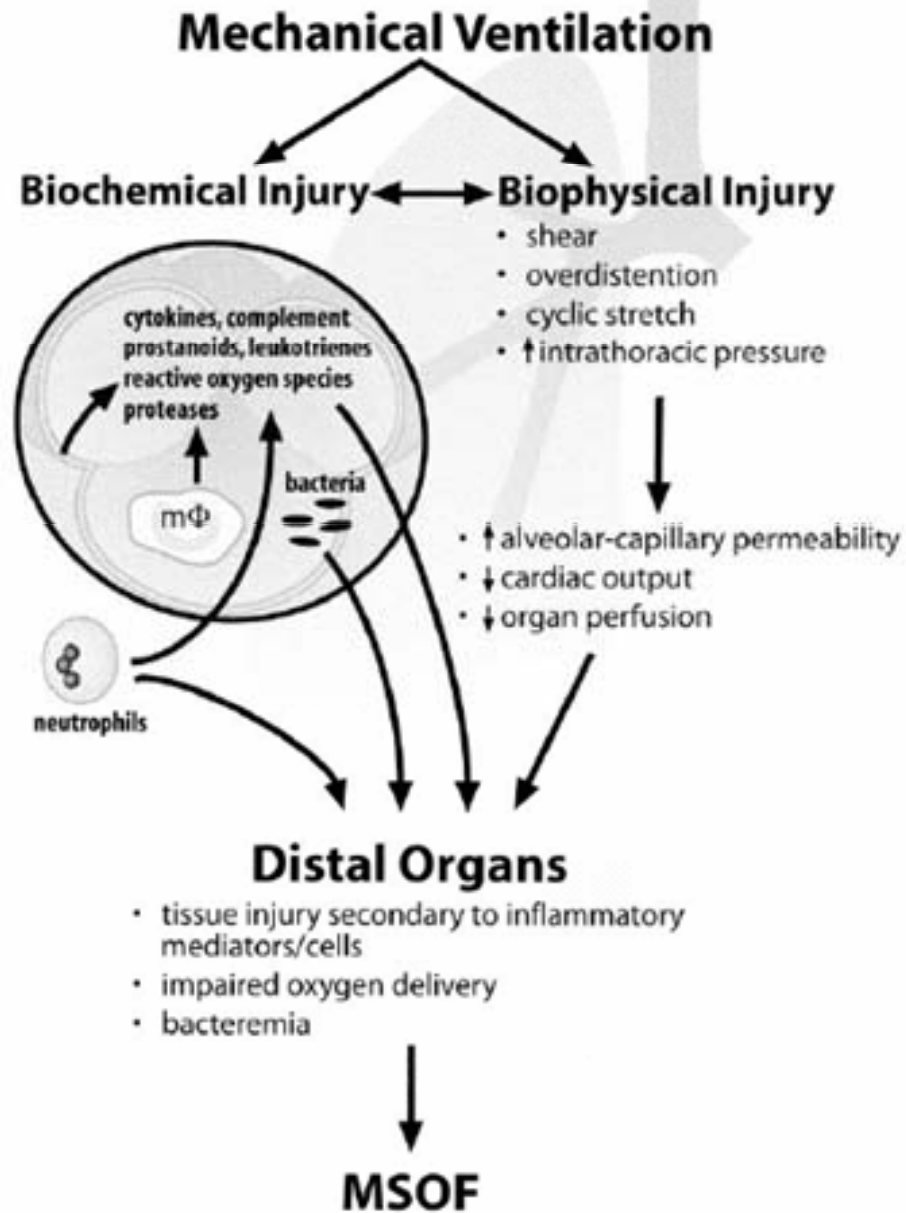


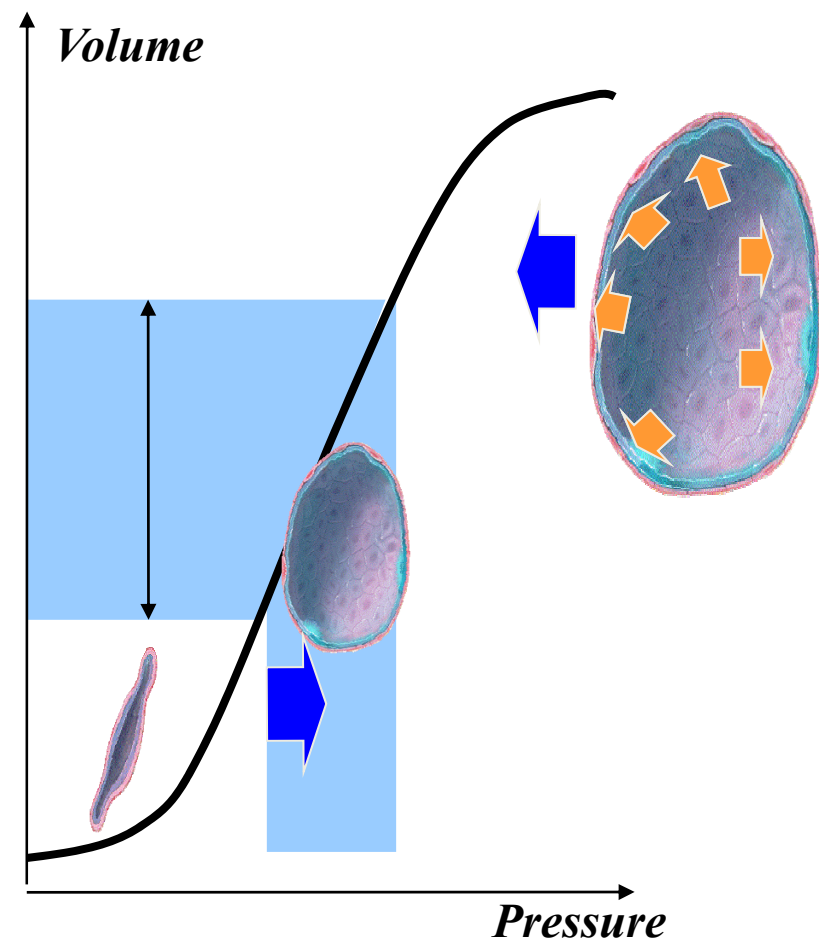
Figure 1. Postulated mechanisms whereby mechanical ventilation may contribute to MSOF.

профилактика VILI

- Адекватный PEEP (сохранение ФОЕ, предотвращение ателектазов)
- Адекватное P_{in} (предотвращение перерастяжения)
- Адекватное время вдоха (соответствующее постоянной времени с учетом измененных показателей механики дыхания)
- Мониторинг механики дыхания
- Использование функции «искусственный вздох»
- Prone-position

Профилактика VILI

1. Установка P_{plat} ниже уровня «клюва»
2. Использование минимально-достаточного V_t
3. Best PEEP



Постоянная времени

Постоянная времени: характеристика «инерционности» дыхательной системы

Параметр T_c описывает время, требуемое для заполнения эластичной замкнутой системы (преодоления сопротивляемости и податливости)

- Достижение соответствующего внутрилегочного давления во время вдоха зависит от постоянной времени=

$$T_c (\text{сек}) = \text{Compliance}(\text{мбар/л}) \times \text{Resistance}(\text{мбар/л/сек})$$

$$1 \times T_c = 63\%$$

$$2 \times T_c = 87\%$$

$$3 \times T_c = 95\%$$

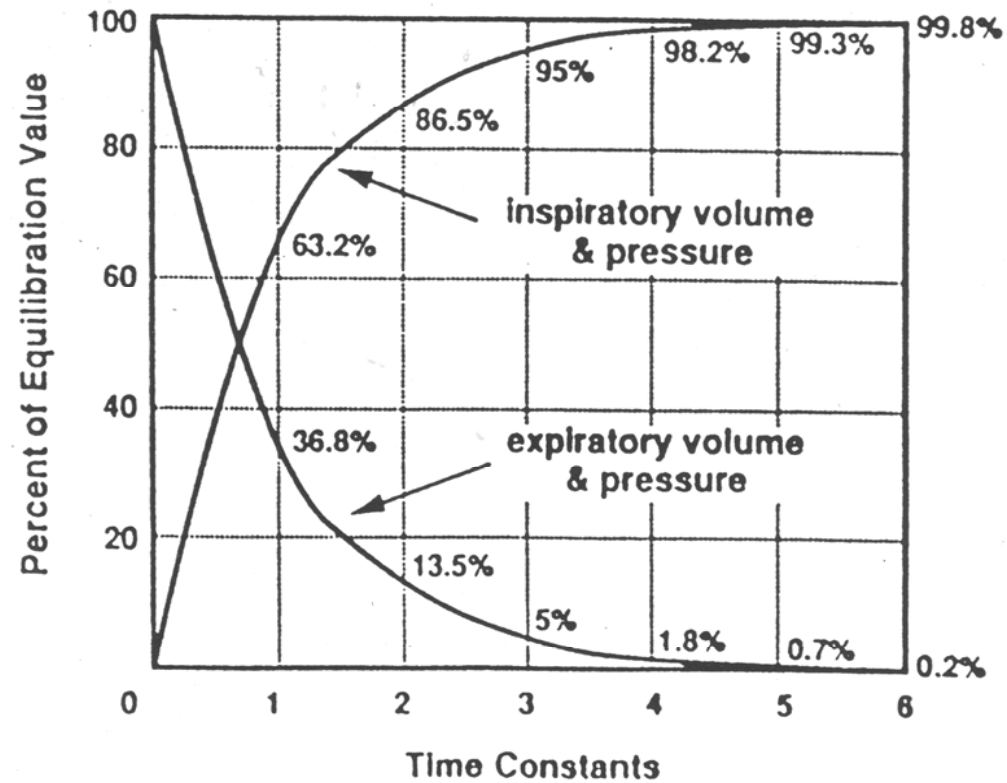
$$4 \times T_c = 98\%$$

$$5 \times T_c = 99\%$$

вдыхаемого/выдыхаемого объема



Постоянная времени



Функциональные и морфологические особенности МКК

- Большая податливость сосудов (зависимость объема русла от экстрамурального давления)
- Низкое сосудистое сопротивление (в 8-10 раз ниже чем в БКК) – 100-220 дин*с*см), которое снижается при повышении давления
- Низкое перфузионное давление:
25/15-15/8 mm Hg

Функциональные и морфологические особенности МКК

Легочные сосуды:

- Экстраальвеолярные (интерстиций) – экстрамуральное давление растягивает стенки сосудов увеличивая их объем
- Альвеолярные сосуды (капиллярное русло) – объем и скорость кровотока зависит от альвеолярного давления
- Изменения внутригрудного давления и объема воздуха в альвеолах при вентиляции легких существенно (но не равнонаправленно) влияют на легочное кровообращение

Функциональные и морфологические особенности МКК

Увеличение объема легких влияет

- На величину и распределение сопротивления легочных сосудов – PVR минимально на уровне ФОЕ.
- При низком объеме PVR увеличено из-за увеличения экстрамурального (интерстициального) давления
- При легочном перерастяжении происходит сдавление альвеолярных сосудов

Влияние гравитации на распределение легочного кровотока (J.West)

The four zones of the lung

