

Технические аспекты ИВЛ

Д.А. Фурманчук

схема аппарата ИВЛ

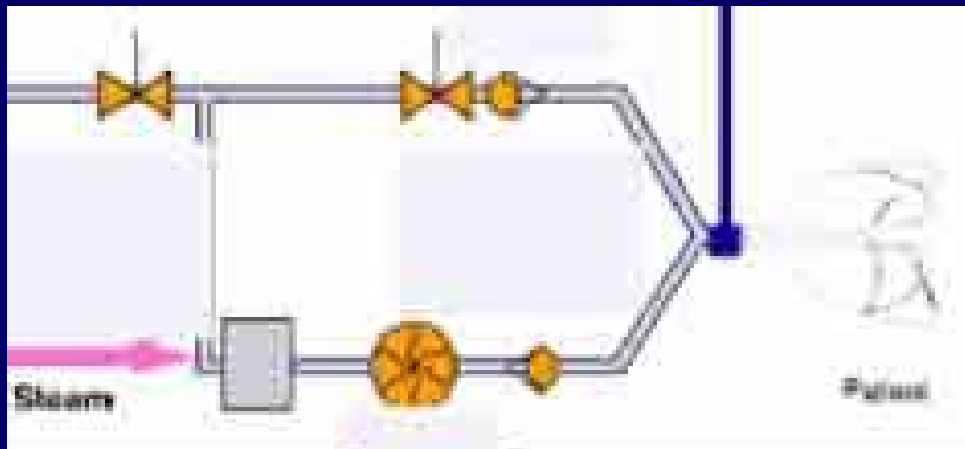
1. Система доставки газов
2. Генератор дыхательного объема
 - Дыхательный мех
 - Электропривод
 - Постоянный поток (поток базовый, инспираторный)
3. Клапаны
 - Инспираторный
 - Экспираторный
4. Датчики потока, давления, концентрации O_2
5. Триггер
 - Поток
 - Давление
 - Импеданс грудной клетки...
 - Чувствительность
 - Время отклика
6. Микропроцессор, программное обеспечение и система мониторинга
7. Дыхательный контур, увлажнитель и т.д.



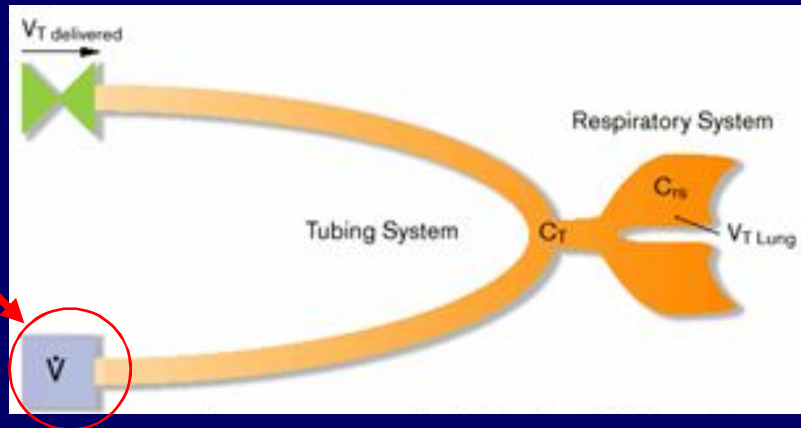
Происхождение дыхательного объема/инспираторного потока



- Дыхательный мех
- Поршневой насос
- Турбина



Клапаны

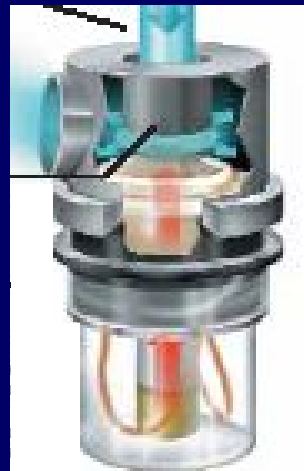


- Инспираторный
- Экспираторный

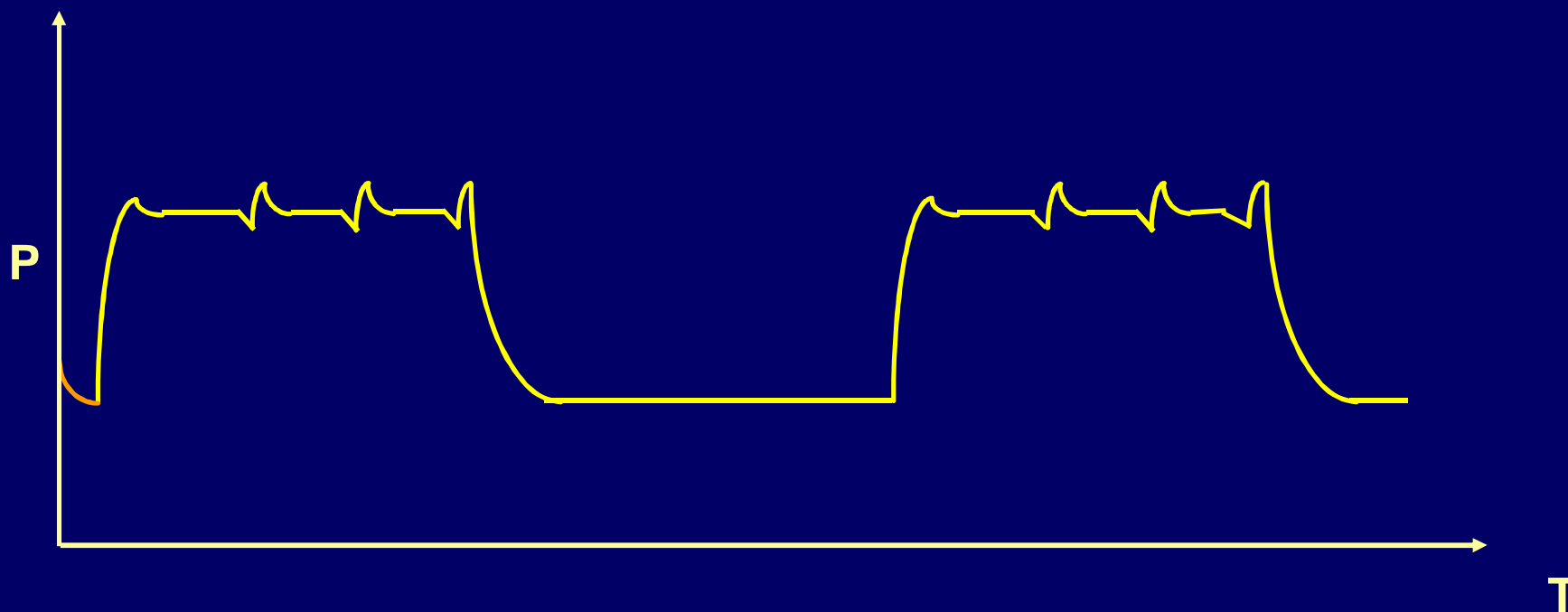
«активный экспираторный клапан»

Характеристика:
Время отклика ≤ 5 мсек

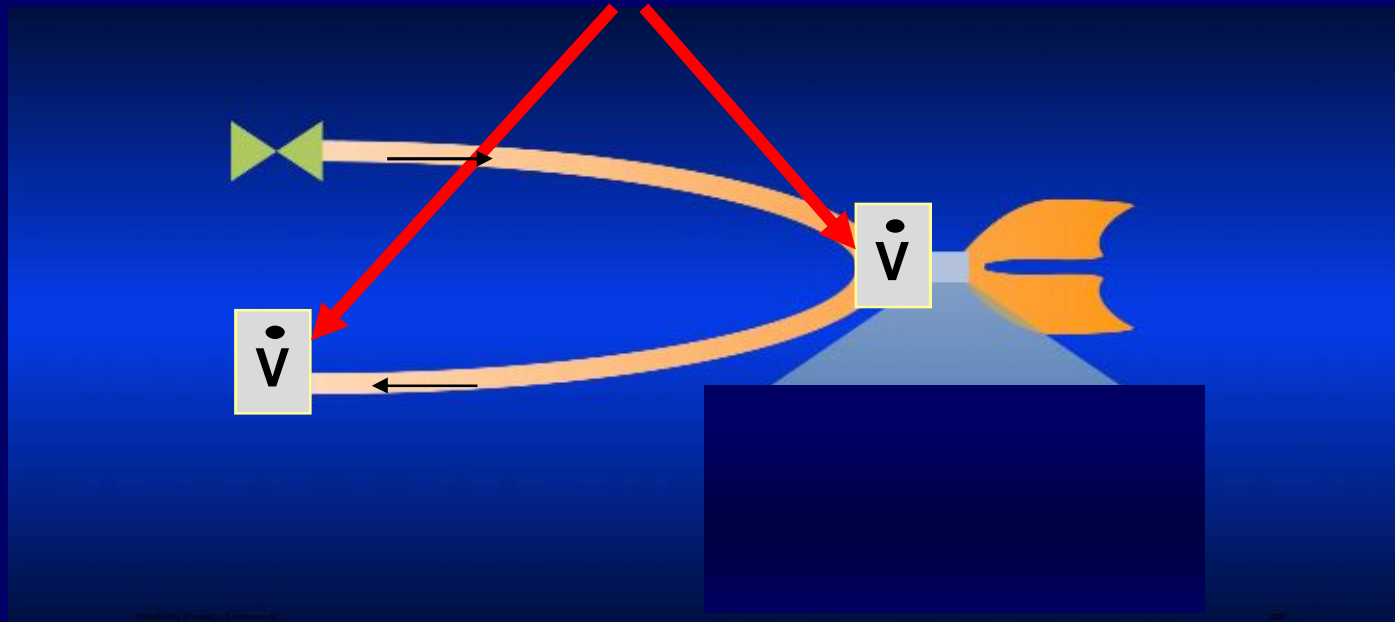
(открытие в ответ на
экспираторное усилие)



«Активный экспираторный клапан»



Измерение потока



Потоковый датчик:
проксимальный
эспираторный

Пневмотахометр
Термоанемометр



Мониторинг концентрации O₂

O₂ сенсор

Электрохимический
Парамагнитный



Расположение

- Инспираторная часть контура
- Забор газа из у-обр. коннектора (боковой поток)



Насколько необходим мониторинг концентрации кислорода?

- **Триггер** – чувствительный элемент, позволяющий аппарату откликаться на инспираторный попытки пациента

Характеристики:

- Время отклика
- Чувствительность

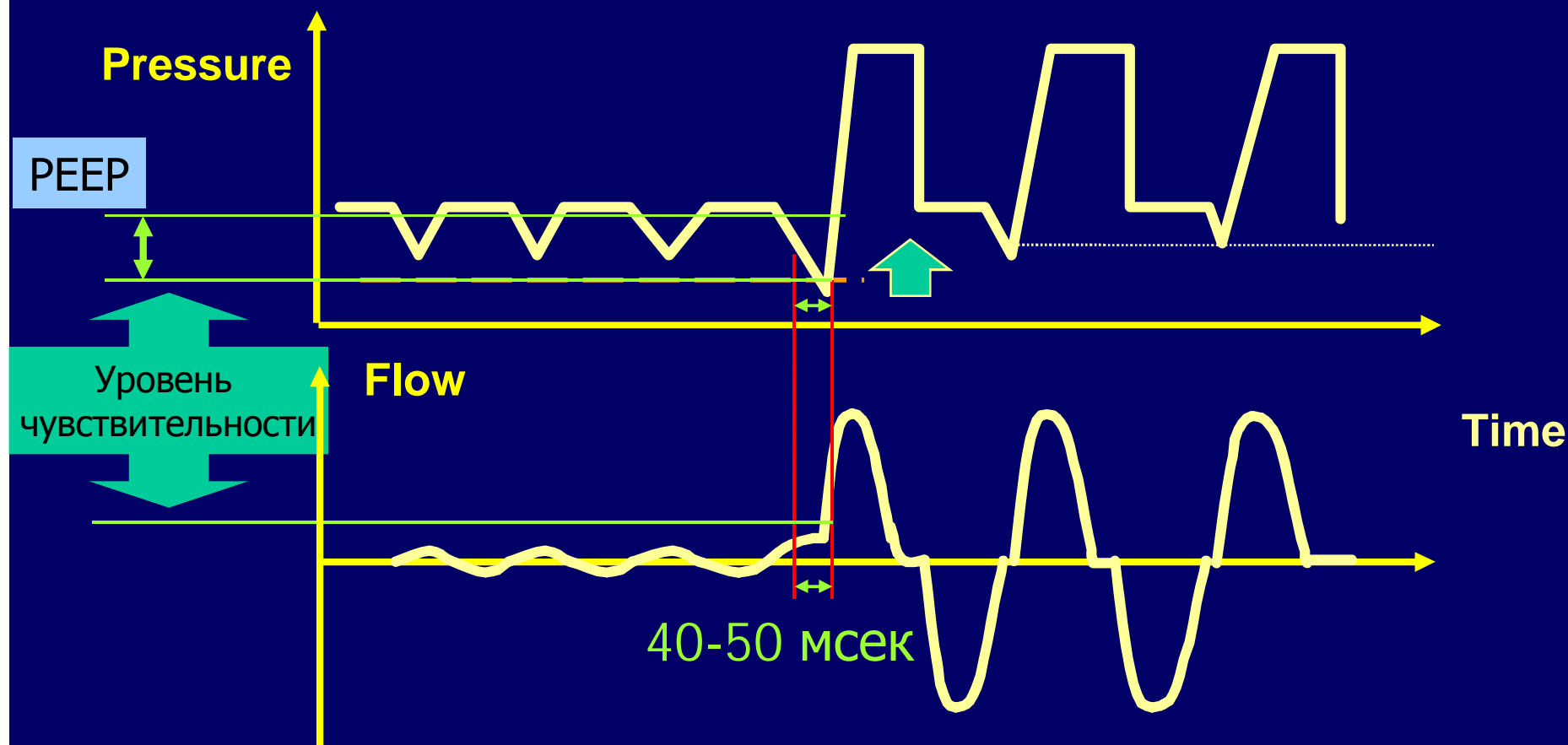
Принцип управления

- Импеданс грудной клетки
- Давление в контуре
- Поток в контуре

Принцип исполнения

- Прессорный
 - Поточный
- термоанемометр
пневмотахометр

Чувствительность и время отклика триггера

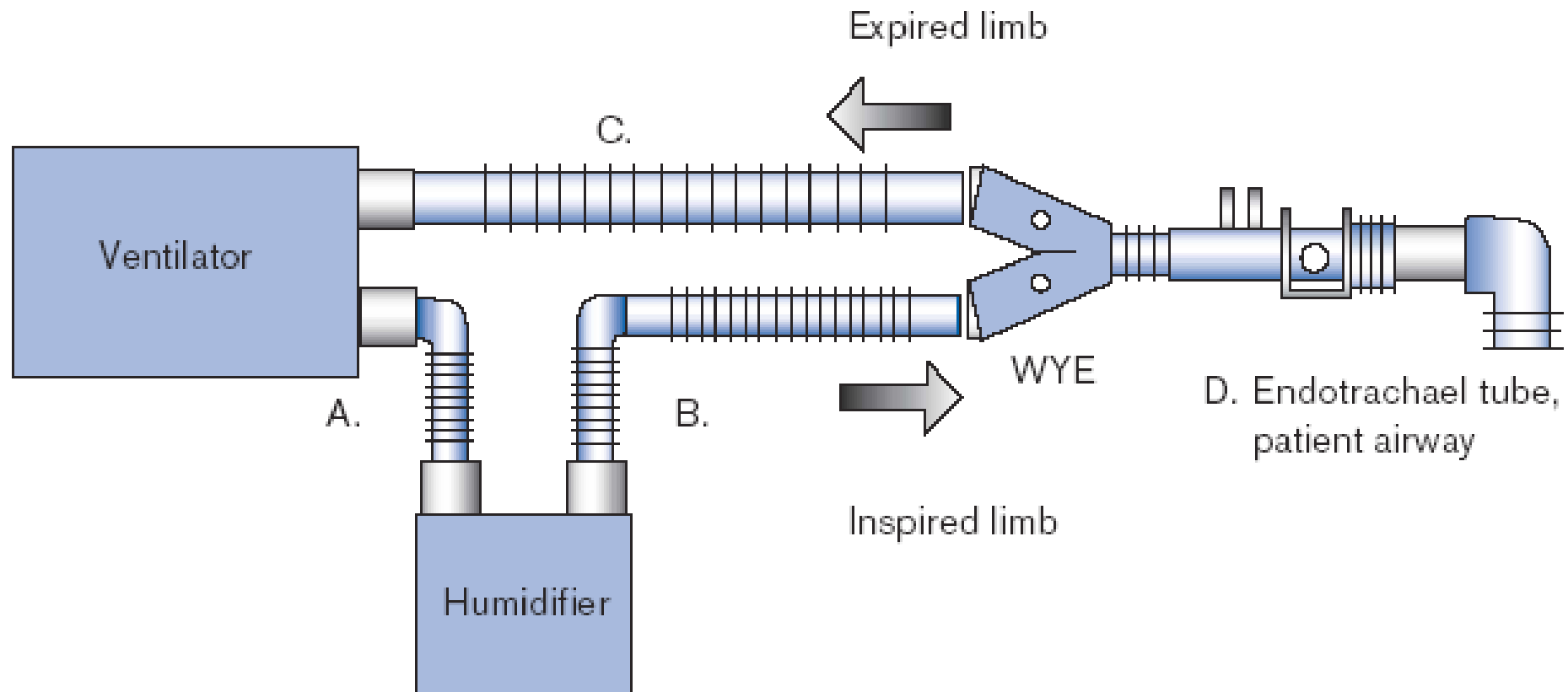


Чувствительность

Flow 0.5-15 л/мин ($1 \text{ л/мин} \cdot 30 \text{ мсек} = 0.49 \text{ мл}$; $15 \text{ л/мин} \dots = 7,5 \text{ мл}$)

Pressure 0.5-20 мбар ниже уровня PEEP

Дыхательный контур



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

- Потери жидкости
- Утрата функции мукоцилиарного транспорта →
- Увеличение R_i, e_x → ателектазирование
- Глубина повреждения пропорциональна экспозиции

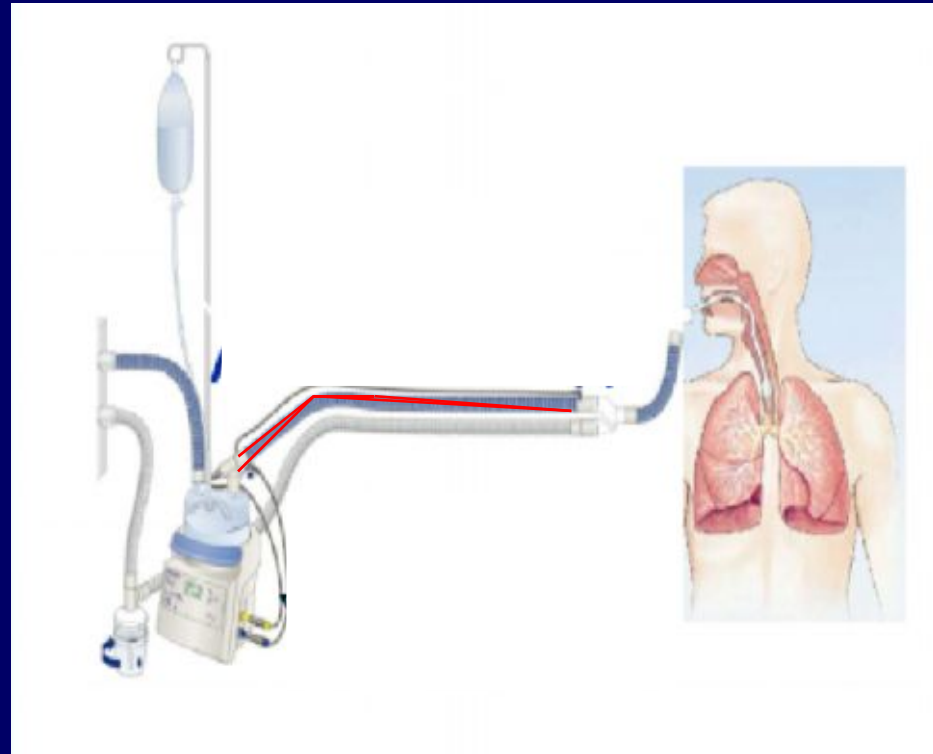
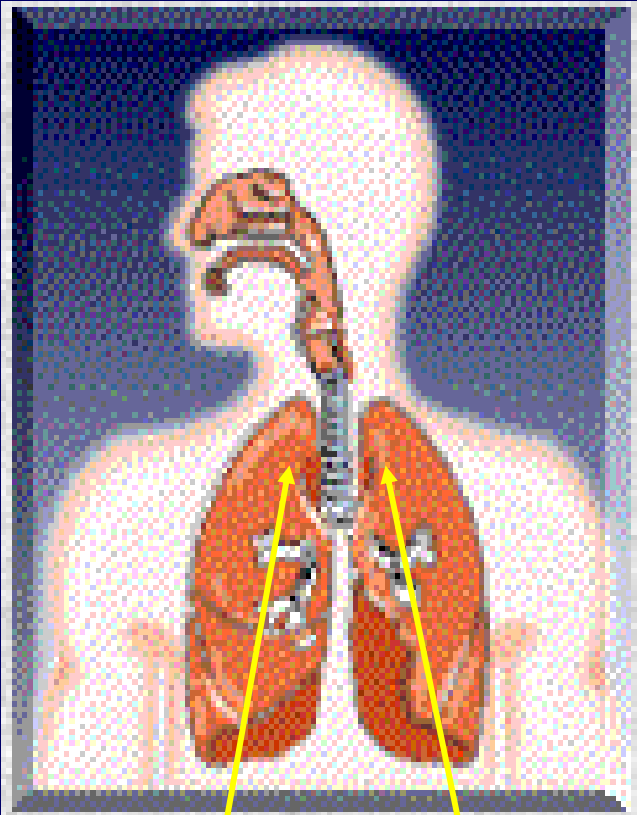
90' дыхания воздухом с влажностью 0% у взрослого человека полностью блокирует мукоцилиарный транспорт на 24 часа

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

Увлажнение вдыхаемого газа

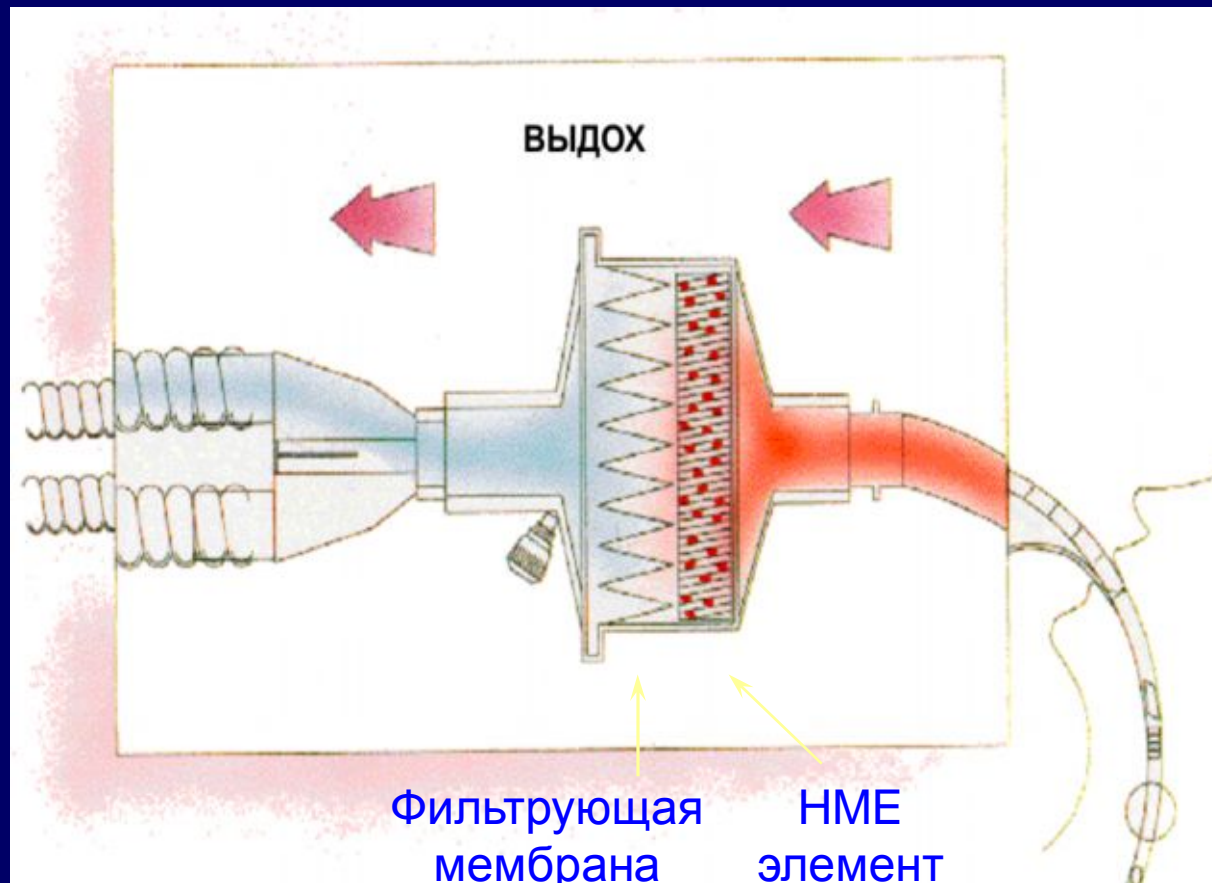
Вид увлажнителя	Область применения	Примечания
Увлажнитель с холодной водой	O ₂ - терапия	
Увлажнители с подогревом камеры	O ₂ - терапия CPAP Неинвазивная вентиляция (сохранение функции ДП)	Температура на уровне у-обр коннектора 31-32°C Влажность 40-55% Конденсат Проблемы в работе триггера
Увлажнители 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

Shelly, M.P., "Inspired gas conditioning." Respiratory Care, 1992; 37(9), 1070-1080.



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

Фильтр НМЕ (тепловлагообменник)



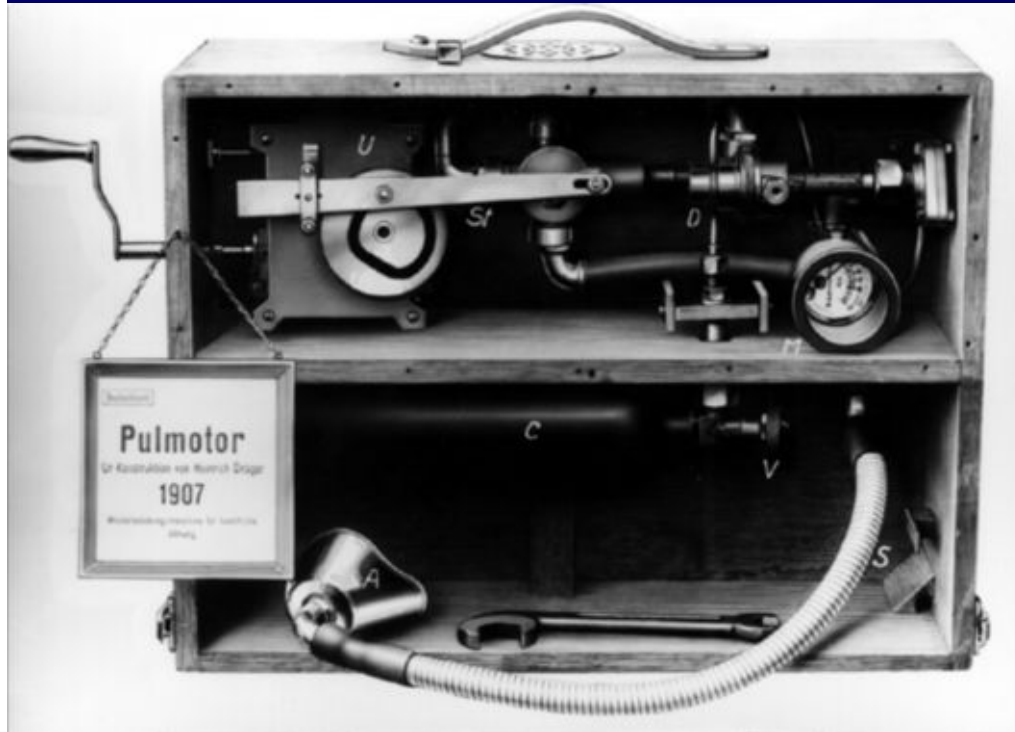
(НМЕ – heat & moisture exchanger)

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



Режимы ИВЛ

<p>Принудительный (контролируемый, управляемый, несинхронизированный)</p>	<p>IPPV=CMV VCV, (V-CMV) PCV, (P-CMV) PLV</p>	<p>IMV</p>
<p>Синхронизированный</p>	<p>SIMV, SIPPV=IPPV/assist=SCMV P-SIMV V-SIMV</p>	
<p>Ассистирующий</p>	<p>ASB = Pressure support PPS® = PAV®</p>	



PPV – positive pressure ventilation



Iron Lung' 1947

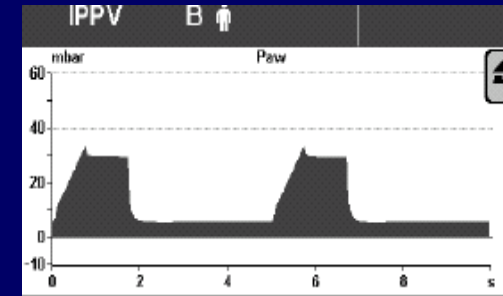
NPV – negative pressure ventilation

Контролируемая ИВЛ

- IPPV

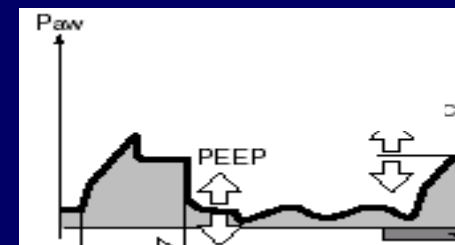
Искусственный вдох

- Начинается через заданный промежуток времени
- Продолжается заданное время
- (в конвенциональном варианте) в фазу аппаратного выдоха самостоятельное дыхание невозможно



- IMV

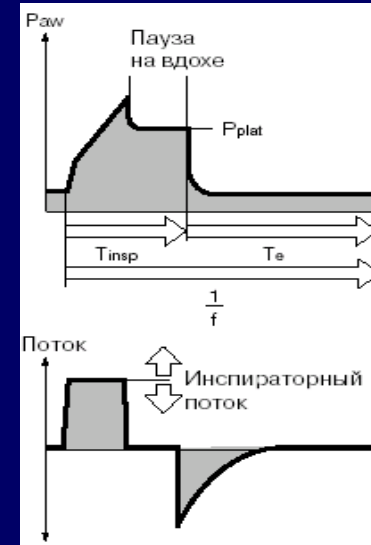
- В фазу аппаратного выдоха, в контуре присутствует поток



Методы формирования дыхательного цикла (методы ИВЛ)

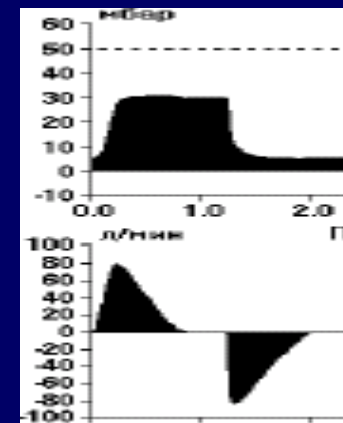
- **Контроль по объему**

Фаза вдувания завершается по достижении заданного объема, либо по истечении времени вдоха (реже) (**Volume Ventilation**)



- **Контроль по давлению**

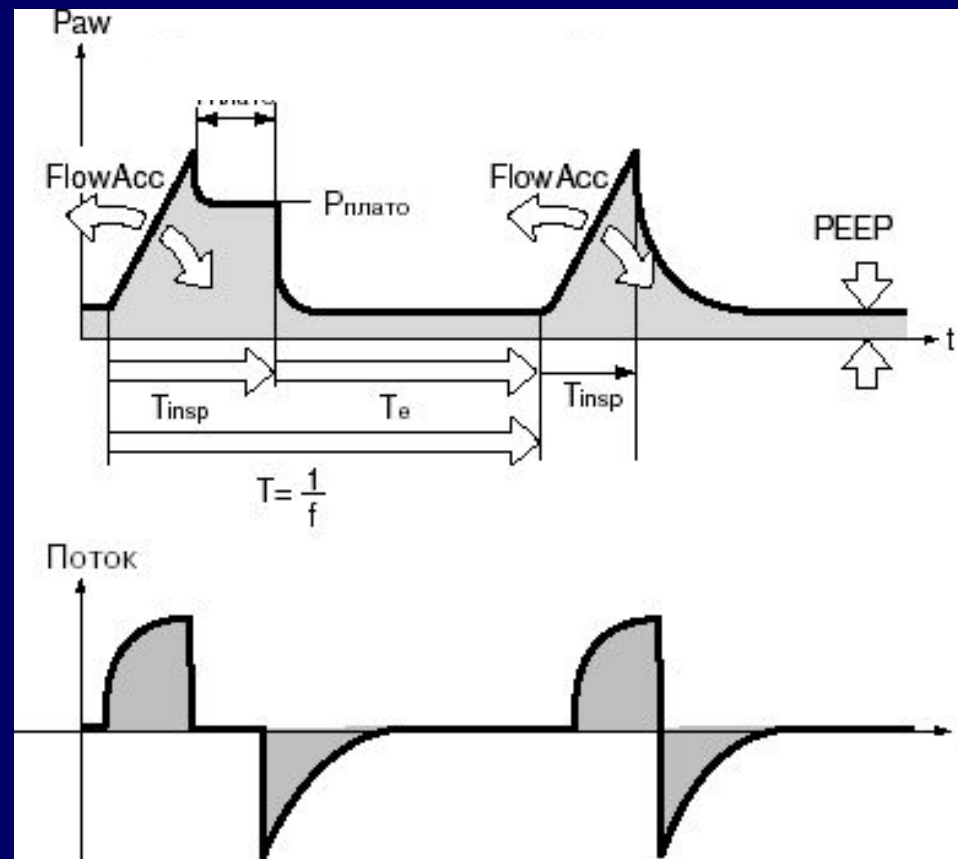
Фаза вдувания завершается в момент достижения заданного давления (**Pressure Ventilation**)



Контроль по объему

IPRV (V-CMV) – объемная принудительная вентиляция

- Вдох начинается по истечении времени в соответствии с заданной частотой
- Аппарат закрывает экспираторный клапан, формирует инспираторный поток (заданный),
- Вдувание завершается когда доставлен заданный объем (поток*время), клапан вдоха остается закрытым на время инспираторной паузы
- По завершении времени вдоха, открывается экспираторный клапан, происходит выдох



Контроль по объему

IRPV (CMV)

Преимущество:

- минутная вентиляция «гарантирована»

Потенциальные проблемы:

- величина инспираторного давления может превышать опасные пределы - ограничение P_{in}
- кашель, сопротивление аппарату всегда приводят к непредсказуемому увеличению давления дыхательных путях
- самостоятельное дыхание затруднительно, дискомфорт, необходимость седации, «синхронизации»

Контроль по объему

IRPV (CMV) – объемная принудительная вентиляция

Регулируемые параметры

V_t – дыхательный объем

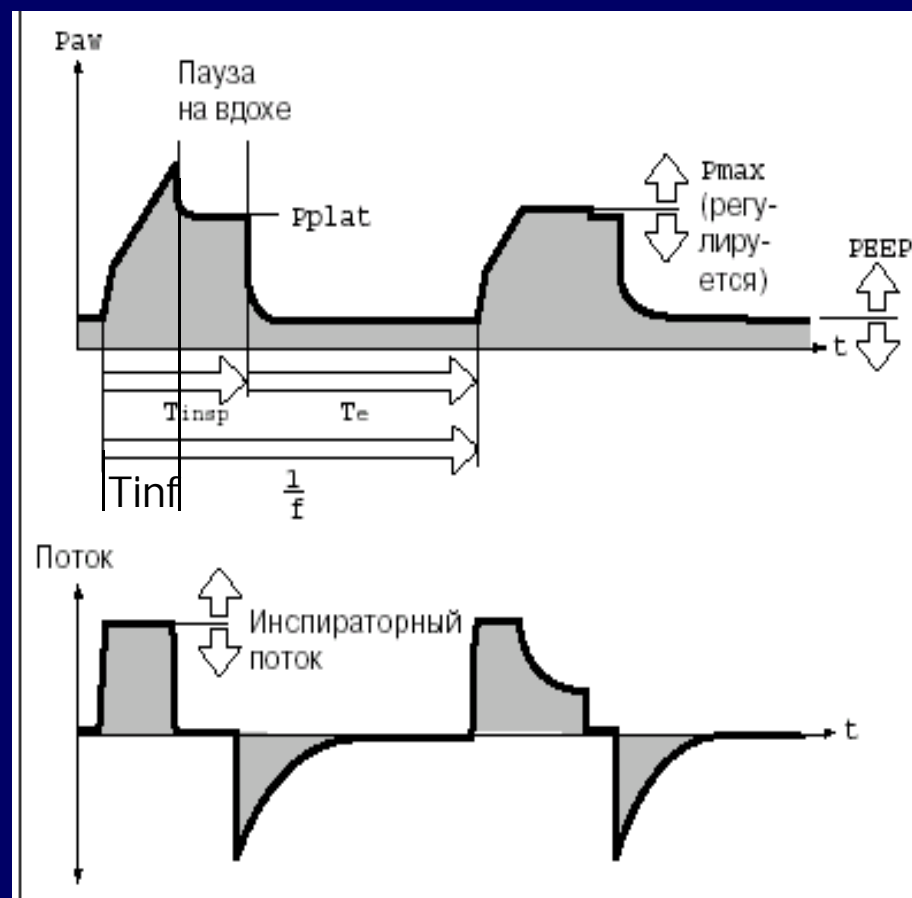
$Flow$ – инспираторный поток

T_i – время вдоха

Fr – частота

PEEP – ПДКВ

FiO_2

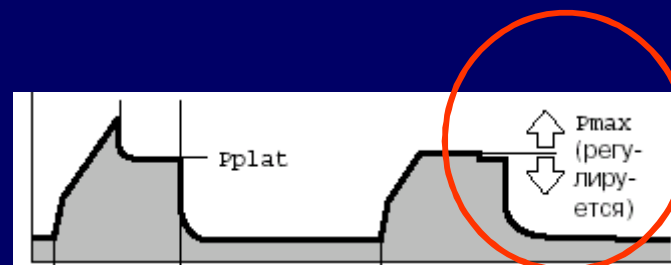


Традиционная IRPV показана при интраоперационной ИВЛ, либо при выраженных нарушениях вентиляции/оксигенации

Контроль по объему

- Управление инспираторным давлением

- P_{max} – максимальное давление



Pressure Limited Ventilation (PLV)

Дыхательный объем может быть нестабильным
(*volume not constant*)

Отсутствие пиков давления, снижается вероятность баротравмы, альвеолярного перерастяжения

Контроль по объему

- Кривая инспираторного потока

- Нисходящая



- Синусоидальная



- Восходящая



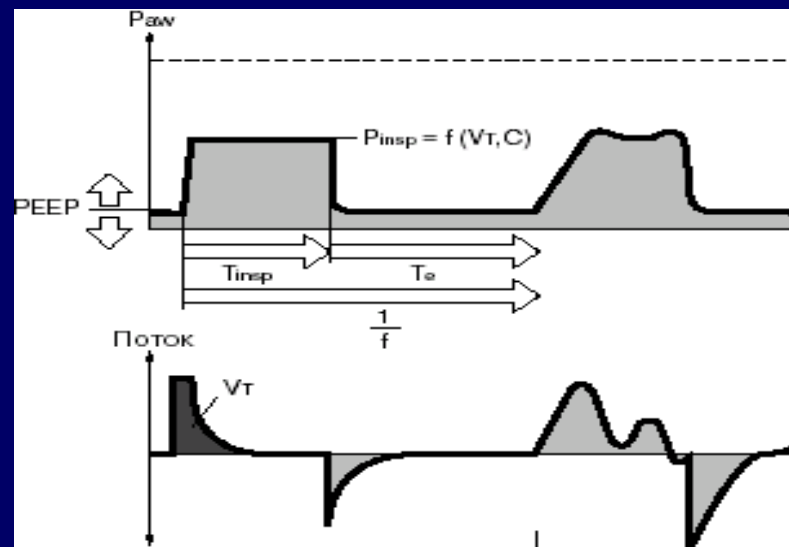
- Постоянная



- Управление инспираторным потоком

- Ручное

- Автоматическое



- AutoFlow, PRVC, VV+

Контроль по объему

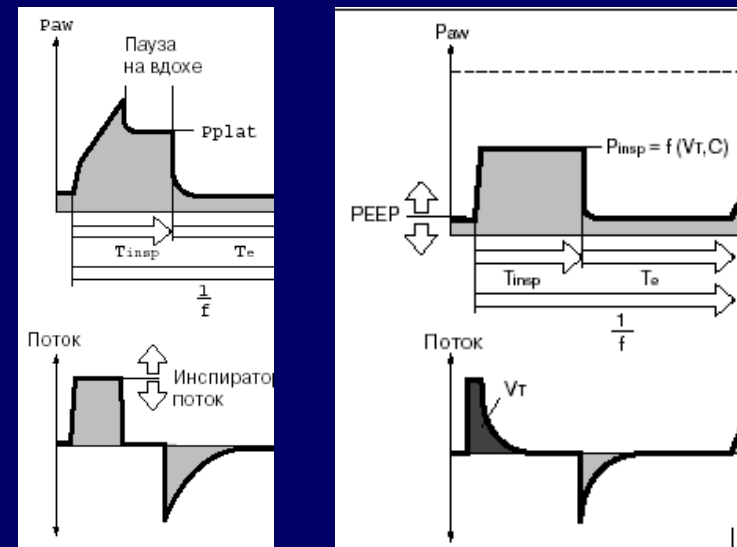
Автоматическая регулировка инспираторного потока

- AutoFlow, PRVC, VV+...

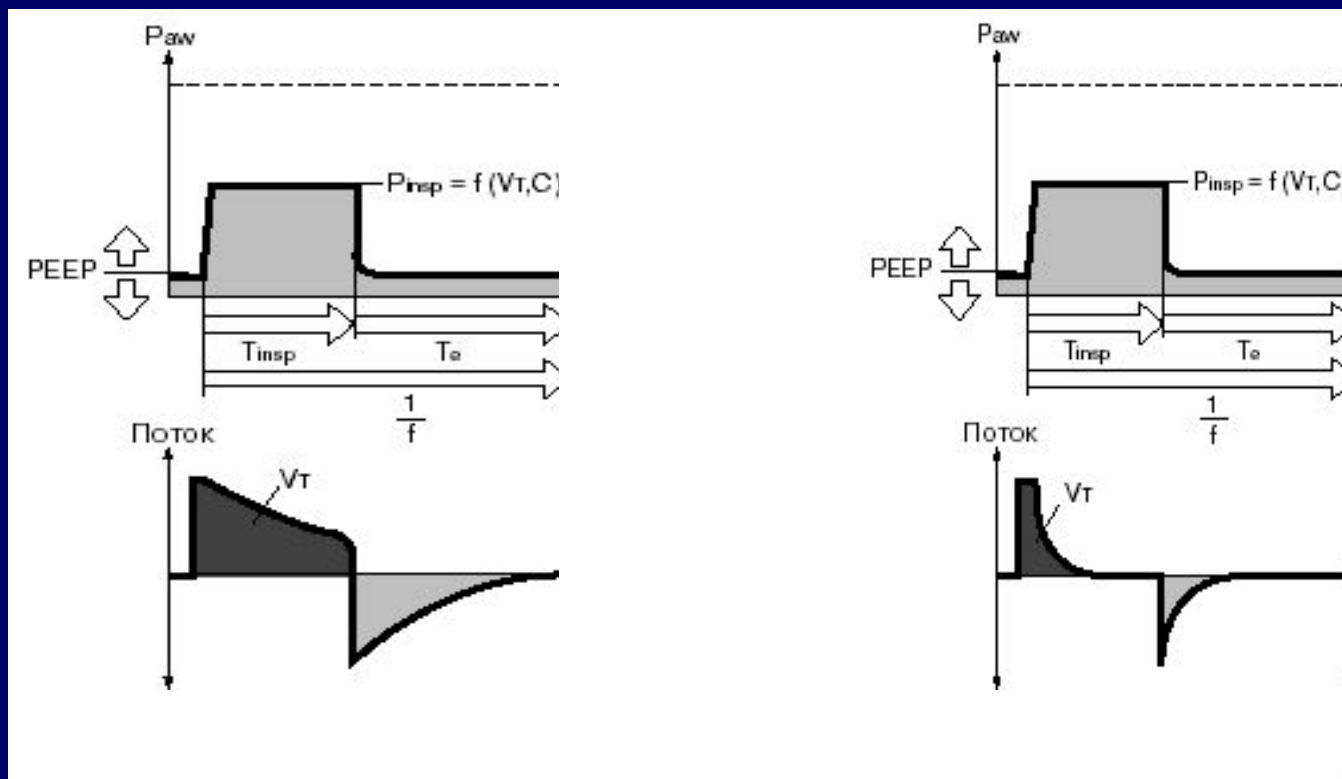
Дополнительная функция (для объемных методов формирования дыхательного цикла) **AutoFlow** подразумевает автоматический выбор инспираторного потока (с учетом текущих механических свойств дыхательной системы (R, C, TC)), с целью доставки заданного объема с минимальным инспираторным давлением.

- Функция обеспечивает автоматическую корректировку потока если свойства дыхательной системы меняются

- Автоматическая настройка инспираторного потока исключает возникновение пиков давления



Автоматическая регулировка инспираторного потока



Контроль по объему

SIMV – синхронизированная перемежающаяся вентиляция

Регулируемые параметры = SIMV

V_t – дыхательный объем

$Flow$ – инспираторный поток

T_i – время вдоха

Fr – частота

PEEP – ПДКВ

FiO_2

+чувствительность триггера



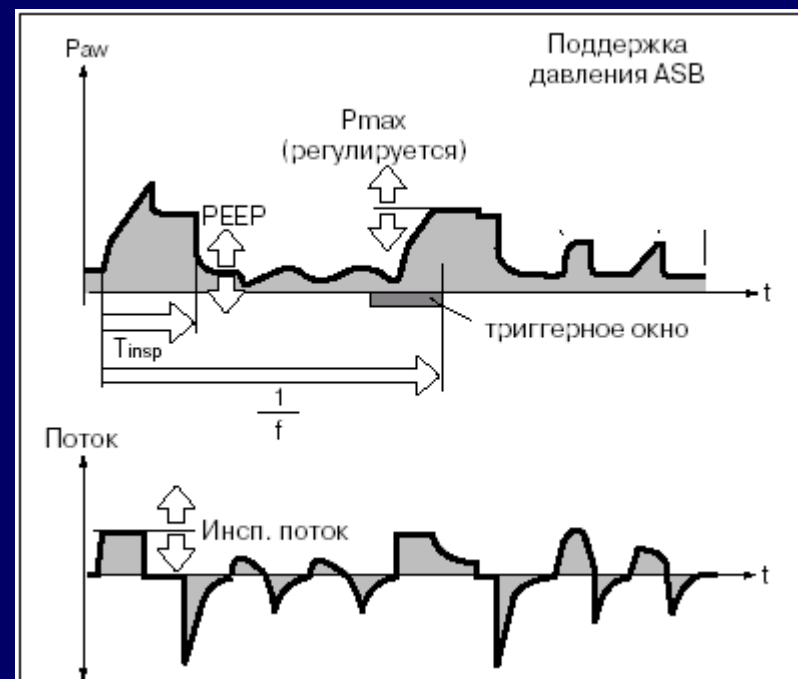
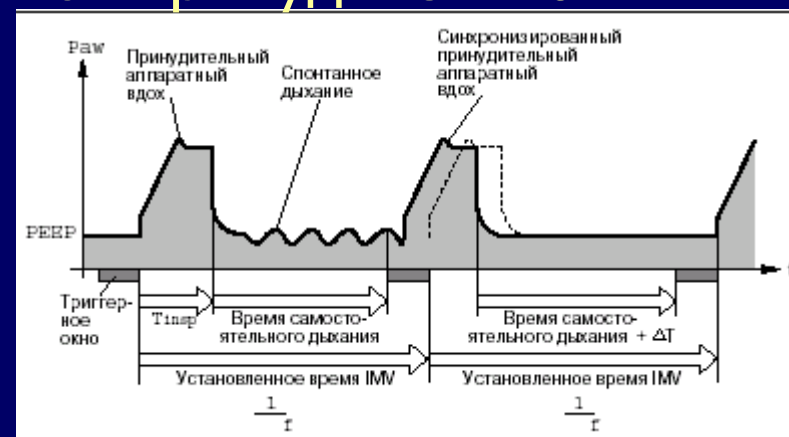
Контроль по объему

SIMV – synchronized intermittent mandatory ventilation
синхронизированная перемежающаяся принудительная
вентиляция

Аппаратный дыхательный цикл имеет аналогичные (**заданные**) характеристики V_t , T_i , что и при принудительной вентиляции

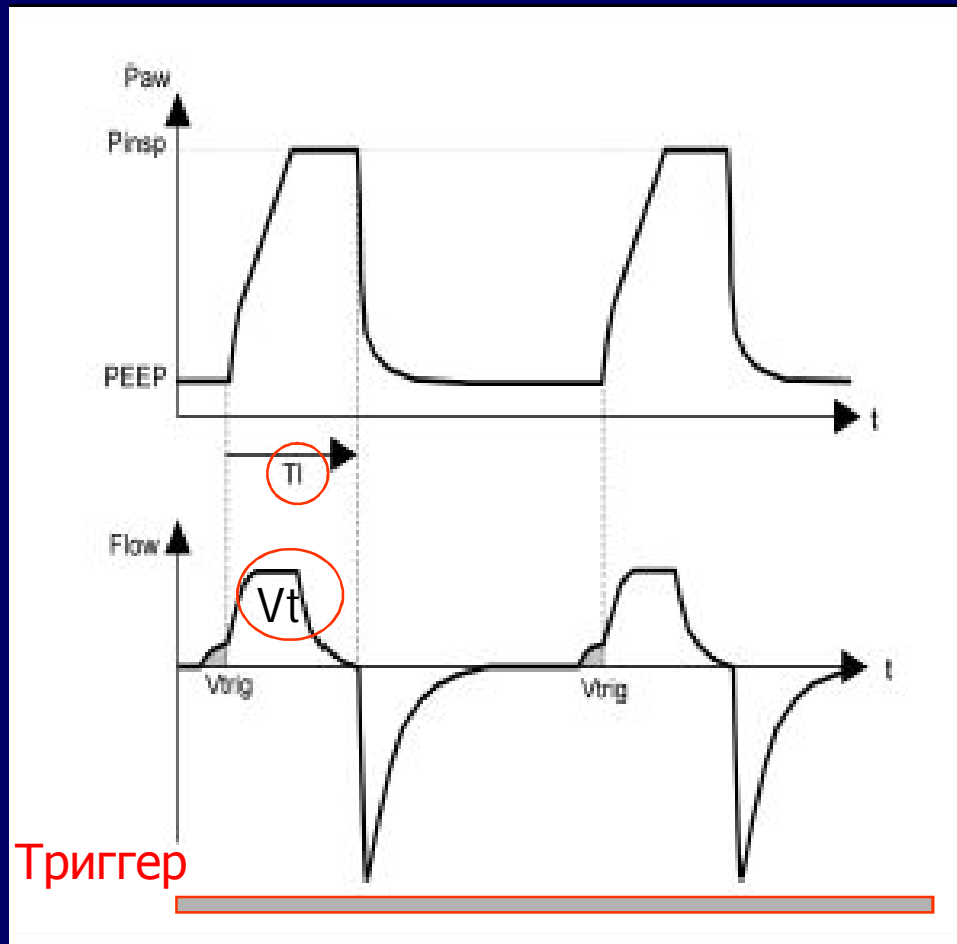
Объем **спонтанного** дыхательного цикла зависит от

- инспираторного усилия пациента,
- величины **базового** потока



Контроль по объему//давлению

- Assist/Control (A/C)
- SIPPV (IPPVassist)
- S-CMV



Принудительная минутная вентиляция Адаптивная поддерживающая вентиляция

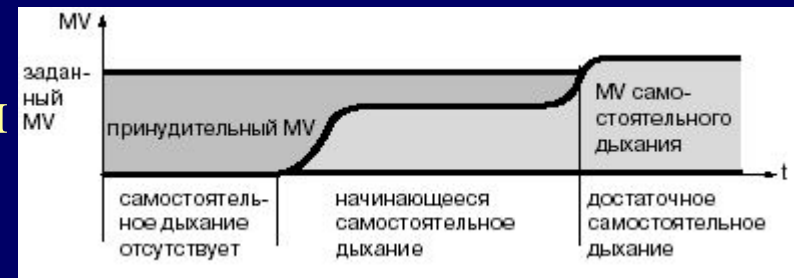
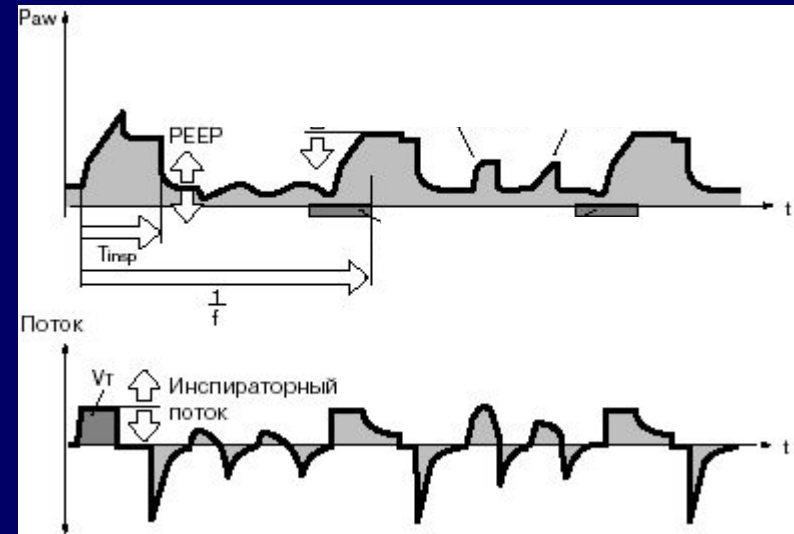
$$MMV \approx ASV$$

Регулируемые параметры :

- Принудительный минутный объем вентиляции (MV) или
- % минутного объема “идеальной” вентиляции

Принудительные дыхательные циклы осуществляется при недостаточном спонтанном дыхании

≈ ASV – дополнительно расчет оптимальной частоты дыхания



$$f\text{-target} = \sqrt{\frac{1 + 2a \times R_{Ce} \times (MV - V'D) / VD - 1}{a \times R_{Ce}}}$$

The Otis formula

Контроль по давлению

PCV (P-CMV) – Pressure Controlled Ventilation

Регулируемые параметры = PCV

P_{in} – давление вдоха

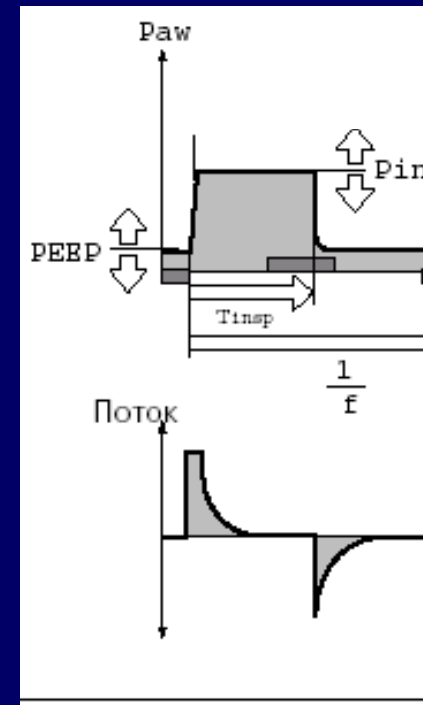
T_i – время вдоха

f_r – частота

R_{amp} - время достижения давления

PEEP – ПДКВ

F_{iO_2}



Производные параметры PCV

V_t – дыхательный объем



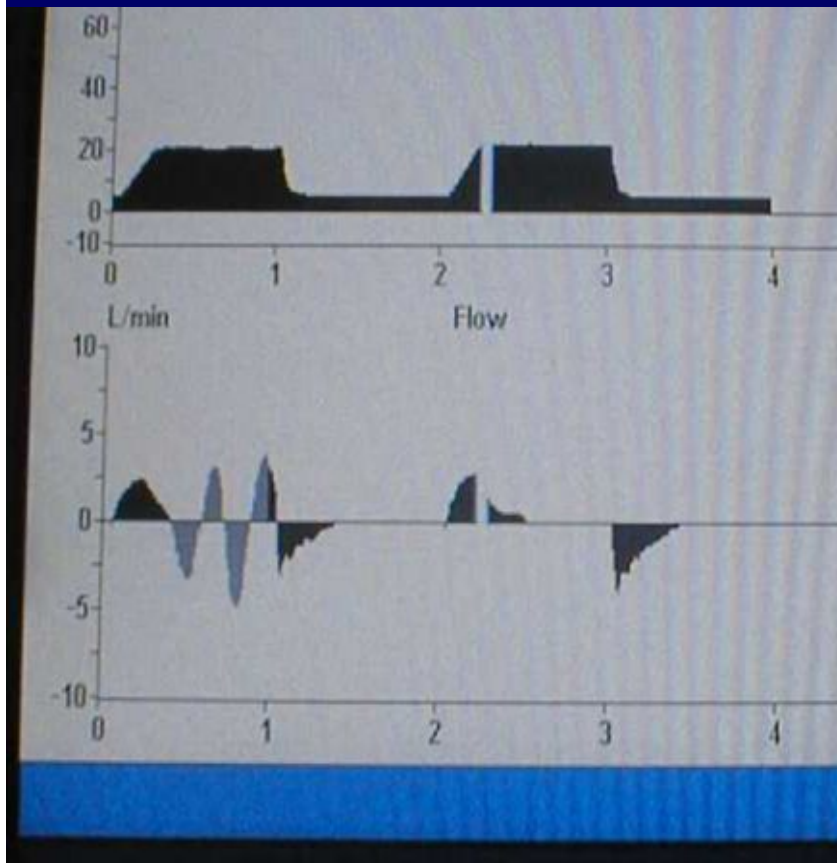
Ramp

Контроль по давлению

BiPAP[®] (biphasic positive airway pressure)

- BiPAP = PCV + работа активного экспираторного клапана

Регулируемые параметры = PCV/BiPAP



P_{in} – давление вдоха

T_i – время вдоха = время фазы высокого давления

T_{ex} – время фазы низкого давления

F_r – частота

$Ramp$ - время достижения давления

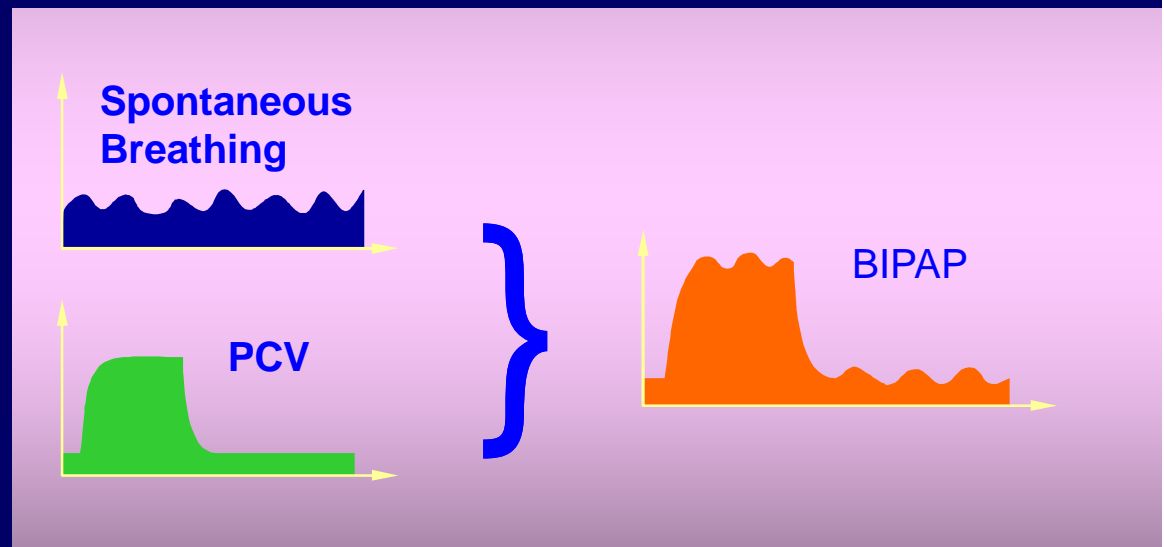
PEEP – ПДКВ

F_{iO_2}

Контроль по давлению

BiPAP® (biphasic positive airway pressure)

- Суммируется негативное давление создаваемое пациентом и позитивное, создаваемое аппаратом
- Улучшается распределение дыхательной смеси при неравномерности вентиляции
- Ликвидируется необходимость в седации



Контроль по давлению

- P-SIMV=BIPAP assist

начало вдоха происходит по истечению времени выдоха
либо синхронно с запросом пациента в соответствии с
триггерным окном формирование дыхательного цикла
соответствует PCV/BIPAP

Регулируемые параметры

P-SIMV=BIPAP assist

P_{in} – давление вдоха

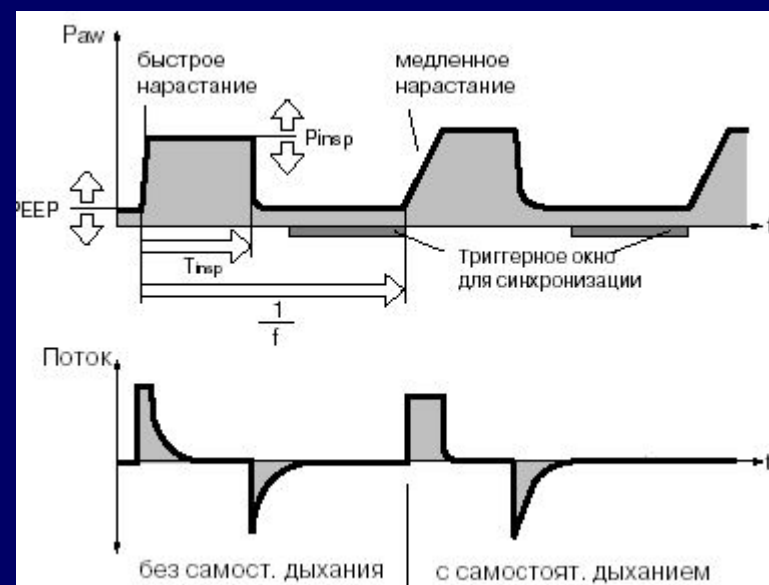
T_i – время вдоха

f_r – частота

PEEP – ПДКВ

F_{iO_2}

+чувствительность триггера



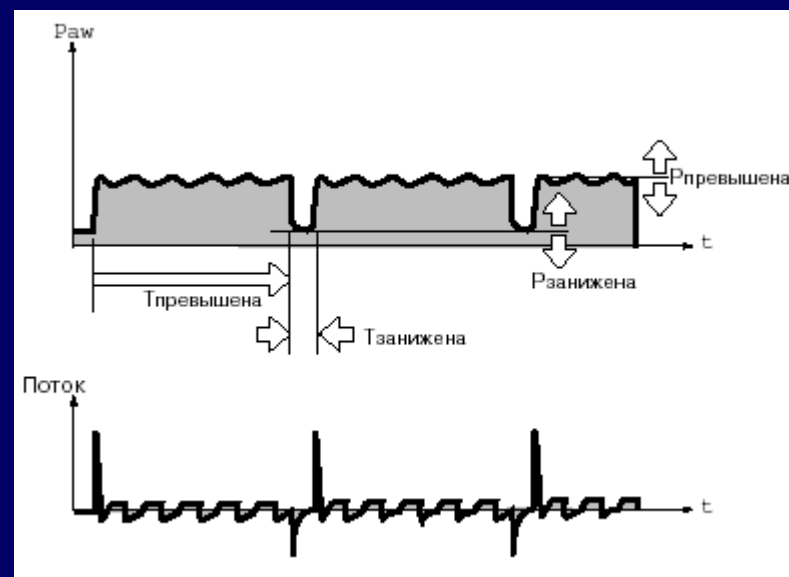
Контроль по давлению

APRV - airway pressure release ventilation
спонтанная вентиляция с периодическим снижением давления в дыхательных путях

Показания:

Поздние стадии развития ARDS (обычно вторая-четвертая неделя вентиляции) с выраженной зависимостью уровня оксигенации от PEEP

Эпизоды «Pressure Release»
Обеспечивают условия для элиминации CO_2



Ассистирующая вентиляция

- ASB Assisted Spontaneous Breathing
- PSV Pressure Support Ventilation

Регулируемые параметры = ASB (PSV)

P_{in} – давление вдоха (давление поддержки)

R_{ramp} – время достижения давления

$PEEP$ – ПДКВ

FiO_2

Время апноэ

Пациент
регулирует

T_i – время вдоха

f_r – частота

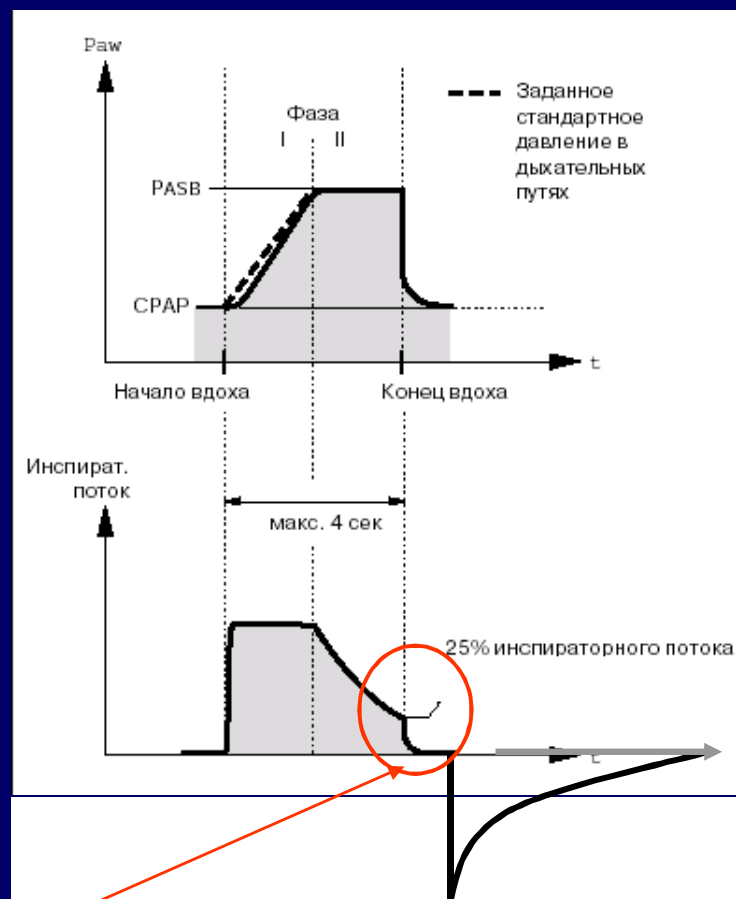
$Flow$ – поток

T_v – дыхательный объем



Ассистирующая вентиляция

ASB
Pressure support



Критерий завершения вдоха

«экспираторный» триггер
E- sensitivity

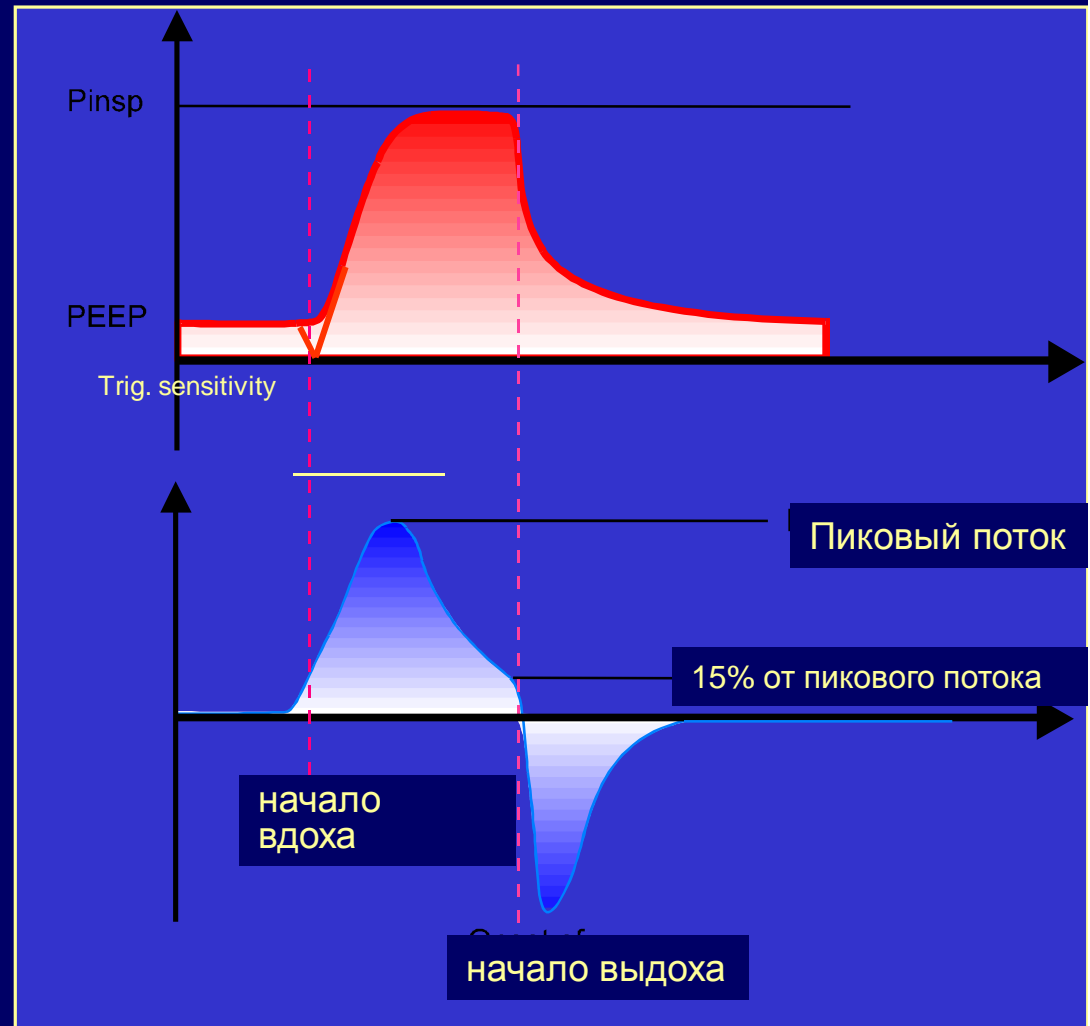
Формирование дыхательного цикла при вентиляции с поддержкой давлением (PSV)

Аппарат выполняет дыхательный цикл в ответ на каждый инспираторный запрос пациента (триггерного окна нет)

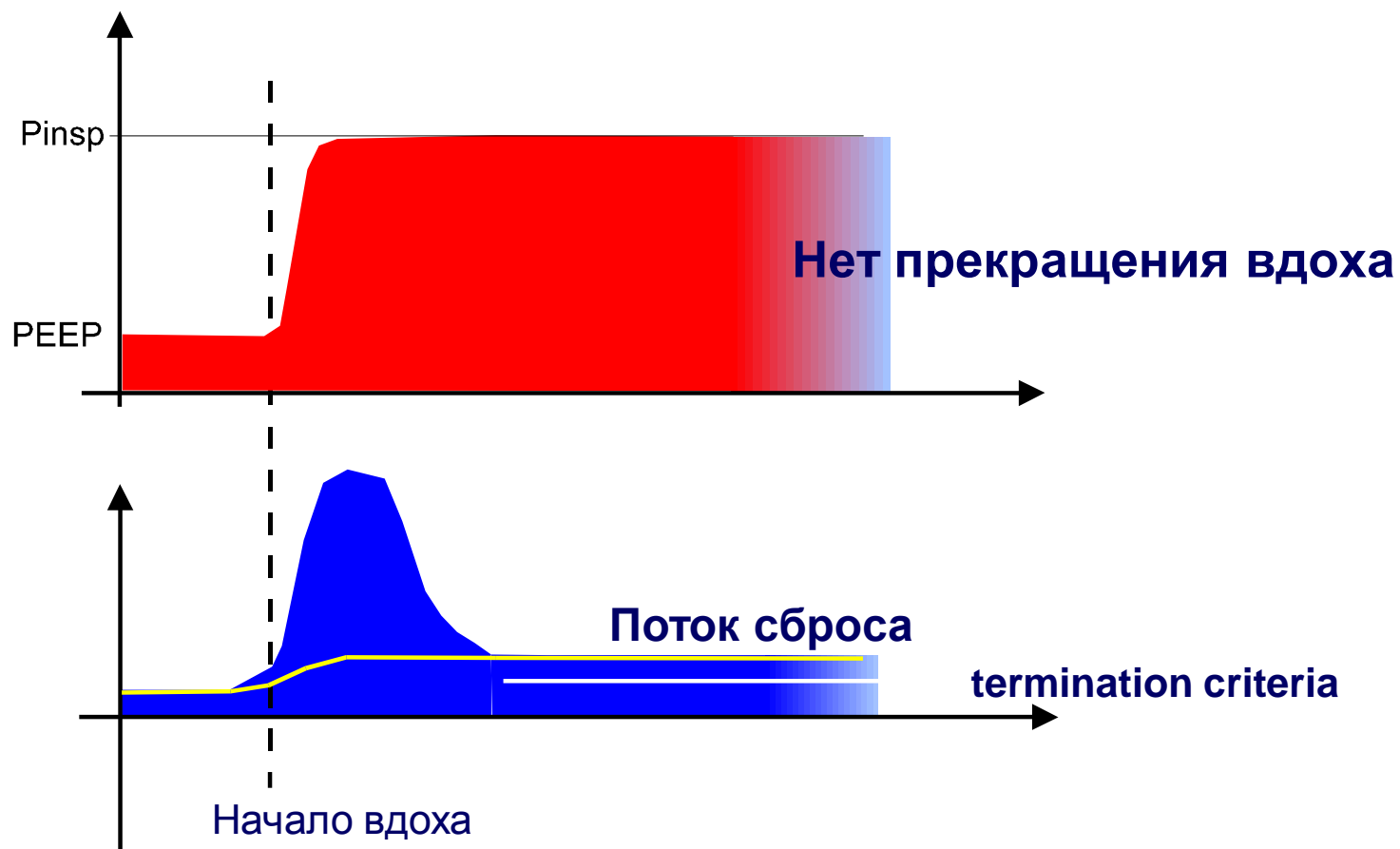
Установленный уровень давления вдоха определяет объем работы дыхания, выполняемой аппаратом

T_I автоматически устанавливается по критерию завершения вдоха

Инспираторный поток и дыхательный объем зависят от интенсивности инспираторного запроса пациента и давления вдоха аппарата



Pressure Support Ventilation в условиях сброса мимо ЭТТ



PSV

Пациент управляет

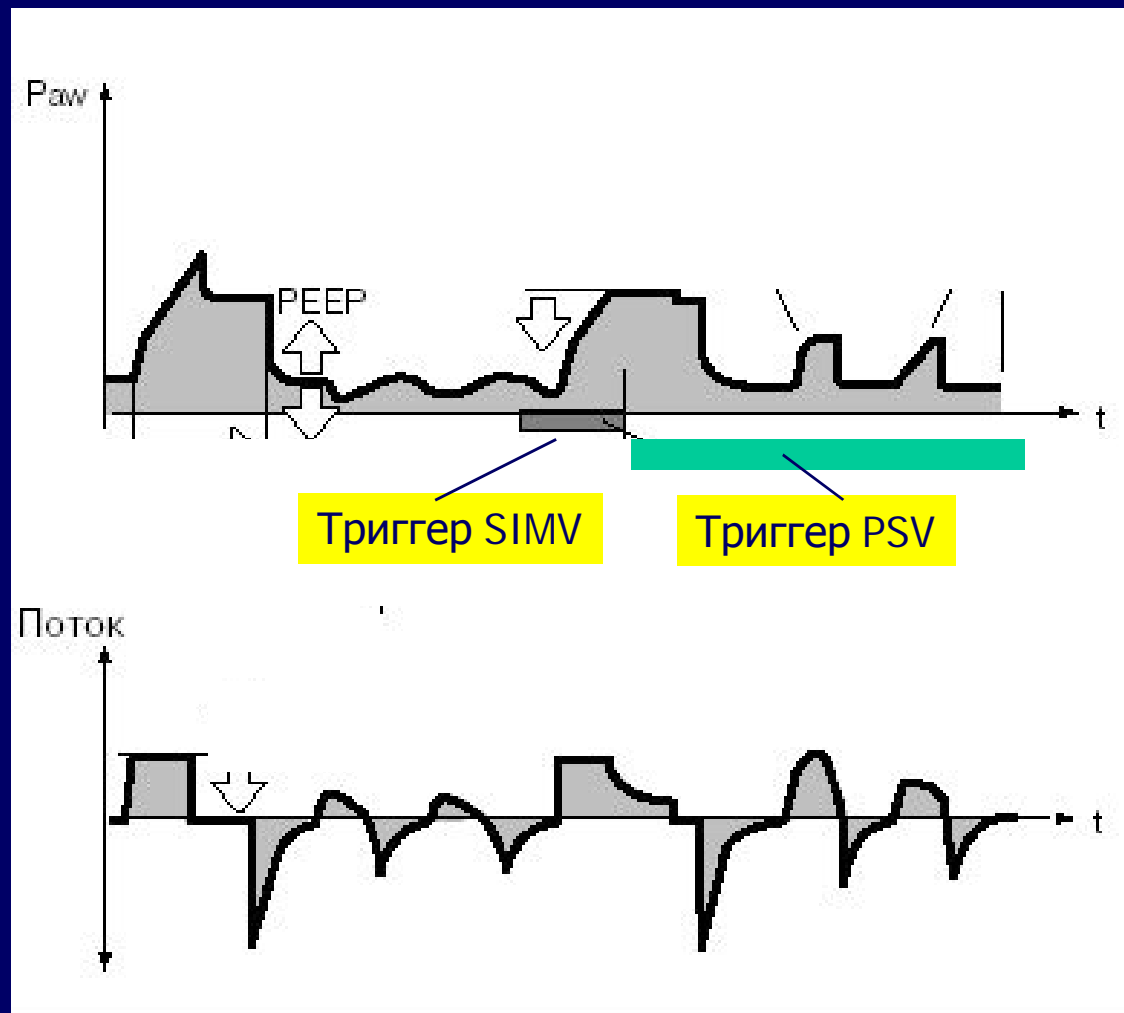
- Началом вдоха
- Глубиной вдоха
- Временем вдоха
- Частотой
- ДО и минутным объемом

Преимущества PSV

- Полная синхронизация с аппаратом
- Возможность вздоха (sigh)
- Снижение потребности в седации
- Отсутствие активного выдоха
- Адекватная тренировка дыхательной мускулатуры
- Эффективная компенсация сопротивления ЭТТ
- Более низкий уровень MAP при таком же минутном объеме дыхания

Комбинированные режимы ИВЛ

- CMV+PSV (ASB), BIPAP+ASB
- SIMV+PSV (ASB)



Вентиляция апноэ

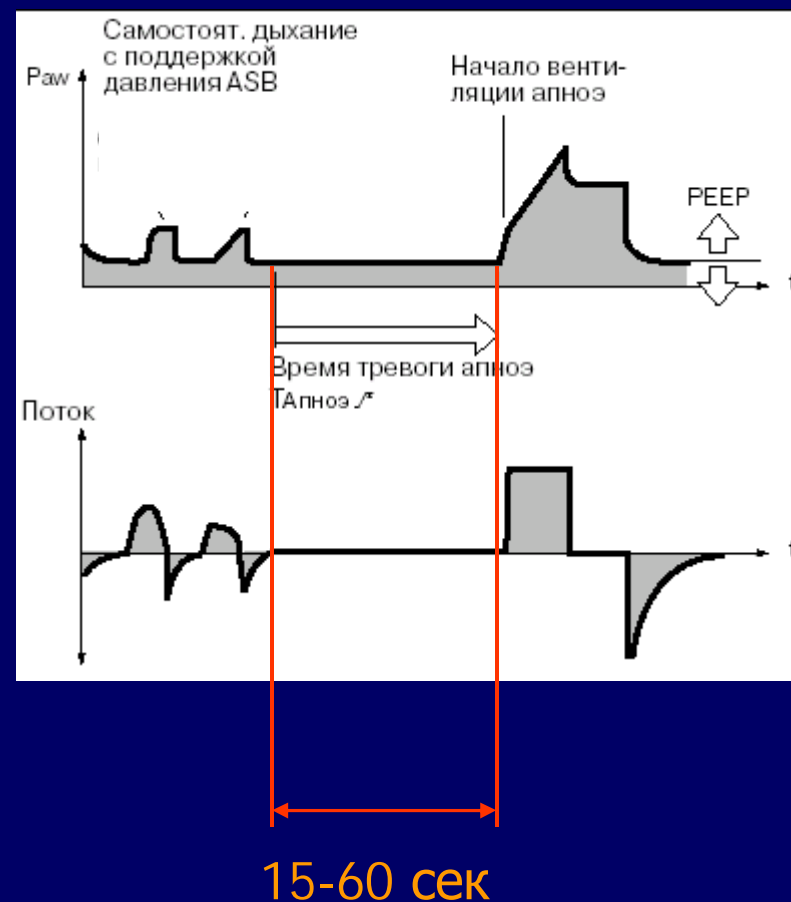
Автоматическое переключение с ассилирующего режима на принудительный при возникновении апноэ

Время апноэ (Apnea time) - 15 - 60 сек

Параметры принудительной вентиляции

T_v , F_r , PEEP

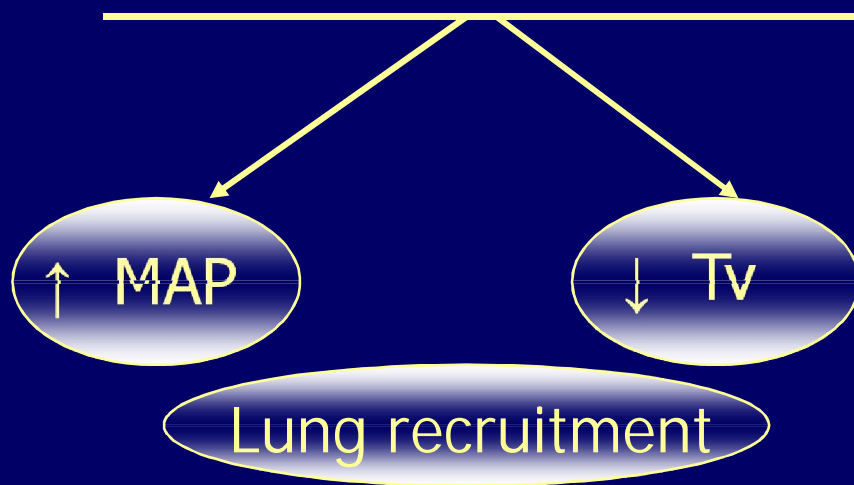
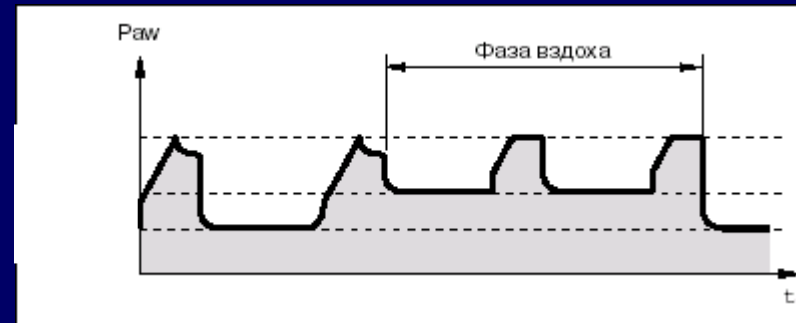
(NBP 840 PCV или IPPV)



Искусственный вздох

Sigh

- Увеличение уровня РЕЕР через определенное время на определенную величину
- Способствует устранению эффекта неравномерности вентиляции



Расправление альвеол с пролонгированной временной константой

Другие алгоритмы SIGN:

- Двойной инспираторный объем
- Дополнительное инспираторное давление

Выбор режима/метода ИВЛ

Возраст/вес

Глубина нарушений газообмена

Патофизиологический вариант дыхательной недостаточности

Наличие спонтанной инспираторной активности

Толерантность к ЭТТ, необходимость седации

Выбор режима/метода ИВЛ

- Возраст/вес

- Вес до 15 кг - рекомендуется ИВЛ с контролем по давлению
- пиковые подъемы давления
- нестабильный комплаинс дыхательной системы
- негерметичные дыхательные пути
- вероятность баротравмы

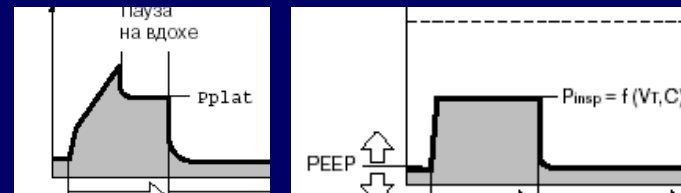
Мониторинг

V_{te}

Минутная вентиляция

p_aCO_2

$ETCO_2$



Выбор режима/метода ИВЛ

Патофизиологический вариант дыхательной недостаточности

Нарушения вентиляции

$\uparrow p\text{CO}_2$

контроль по объему

- Минутная вентиляция
- Частота (Freq)
- Время выдоха (T_{ex})
- Вентиляция мертвого пространства

Нарушения оксигенации

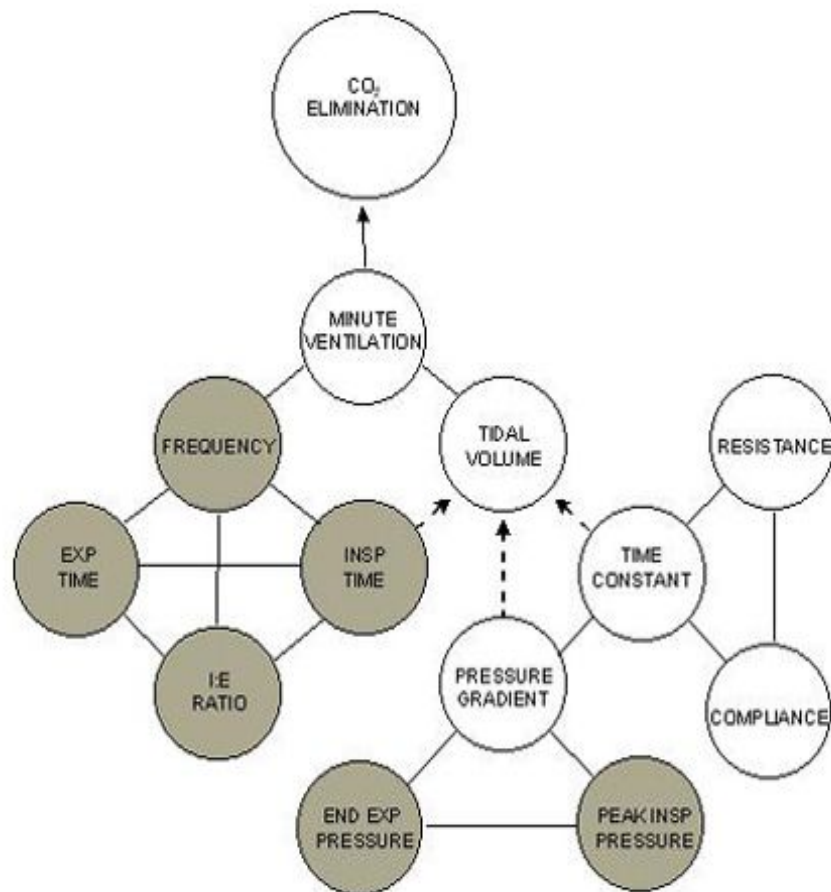
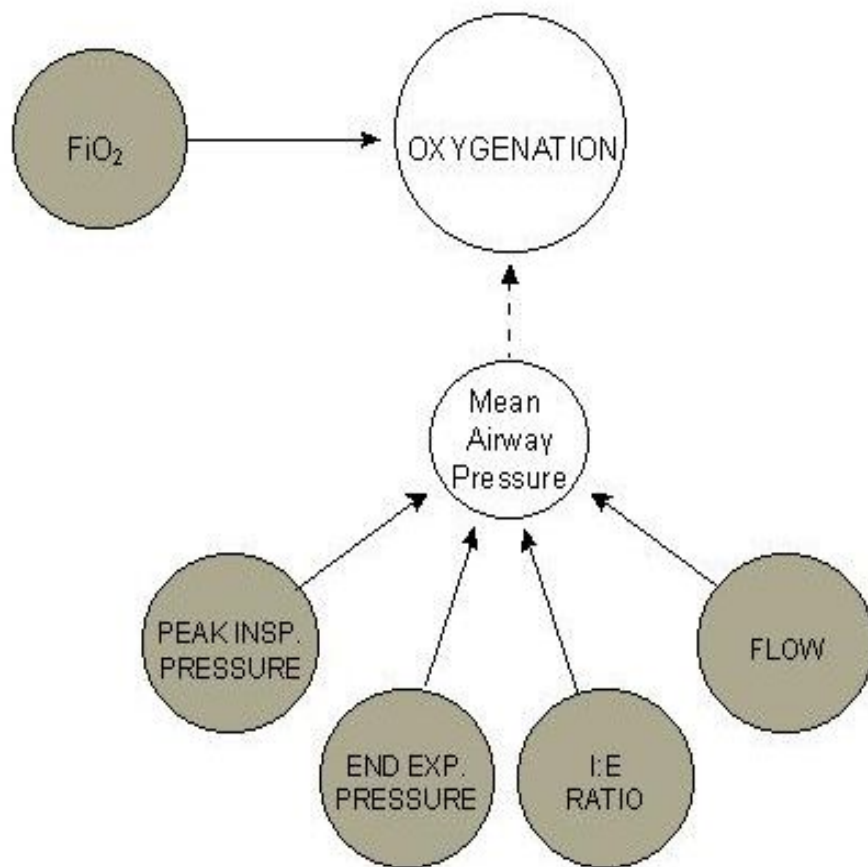
$\downarrow p\text{O}_2$

контроль по давлению

- ПДКВ (PEEP)
- Давление вдоха (P_{in})
- Время вдоха (T_i)
- FiO₂

Выбор режима/метода ИВЛ

Патофизиологический вариант дыхательной недостаточности



Выбор режима/метода ИВЛ

- Спонтанная инспираторная активность

Отсутствует

(релаксанты, кома,
нарушения нейро-
мышечной проводимости)

контролируемая вентиляция
CMV, IPPV, PCV/BIPAP

В наличии

показатели газообмена
на фоне ИВЛ

декомпенсированы

компенсированы

ассистирующая вентиляция
ASB/Pressure support, BIPAP,
→ отлучение от ИВЛ

? SIMV, P-SIMV ?

Выбор параметров ИВЛ

- Частота
- Время вдоха, соотношение I:E
- Давление вдоха
- Максимальное давление
- PEEP
- Дыхательный объем
- FiO₂

Выбор параметров ИВЛ

Инструменты для улучшения оксигенации

- PEEP
- Pin
- Ti
- FiO₂

Инструменты для улучшения вентиляции

- Tv
- Freq
- Tex

Частота (frequency)

Контролируемая вентиляция

- новорожденные-дети до 6 мес 28-35'
- 1-5 лет 20-25'
- 6-12 лет 15-20'
- >12 лет 12-15'

Ассистирующая вентиляция

- частота зависит от настройки чувствительности триггера, спонтанной частоты пациента
- капнографический мониторинг

I:E

Время вдоха =

время вдувания + время паузы

Время вдоха – один из параметров, определяющих величину **MAP** → «экспозицию» свежего газа в альвеоле и эффективность оксигенации

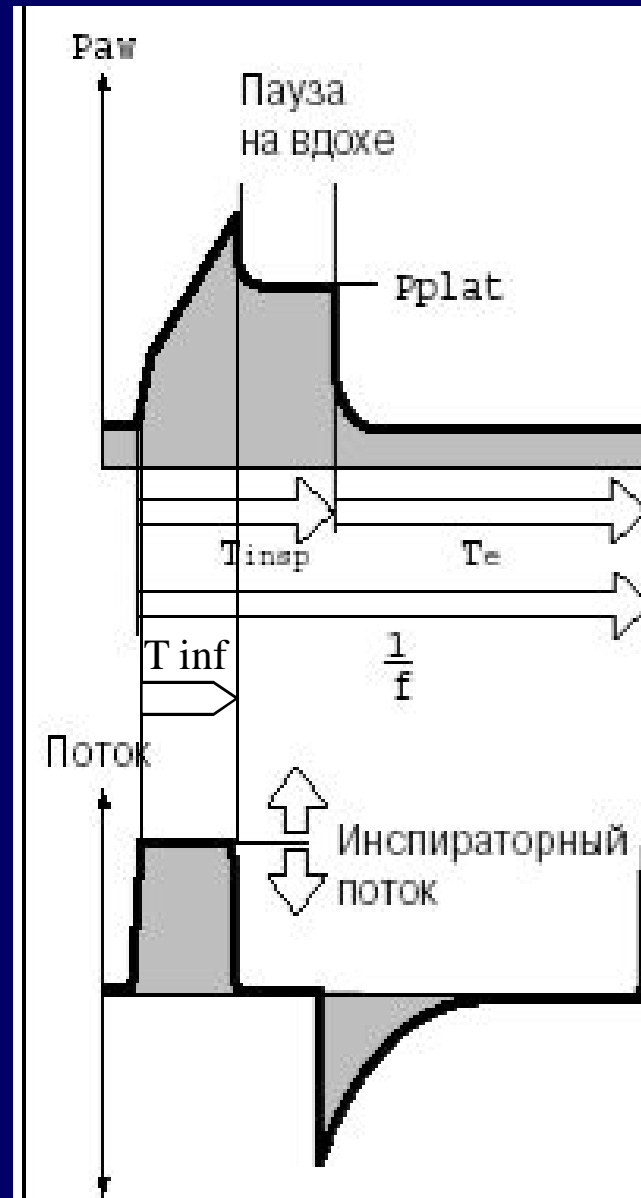
Физиологические пределы T_{insp} :

1:2-1:3

Избыточное время вдоха

- создает дополнительное препятствие легочному кровотоку
- способствует укорочению времени выдоха → условия для air-trapping

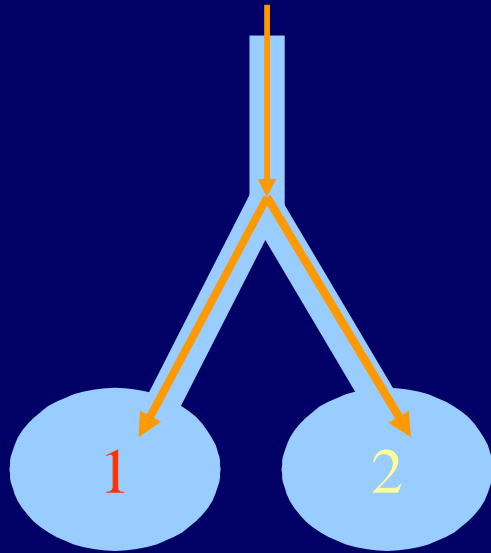
Инверсированное соотношение I:E



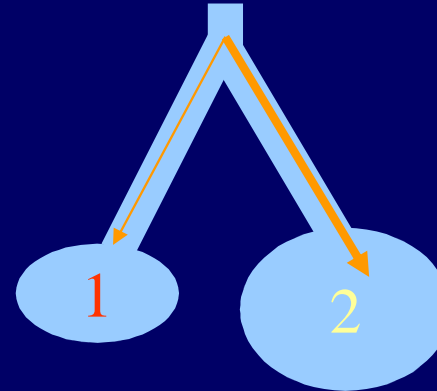
I:E

Норма = 1:3 - 1:2 - 1:1,5

Рестрикция = 1:1 - 4:1

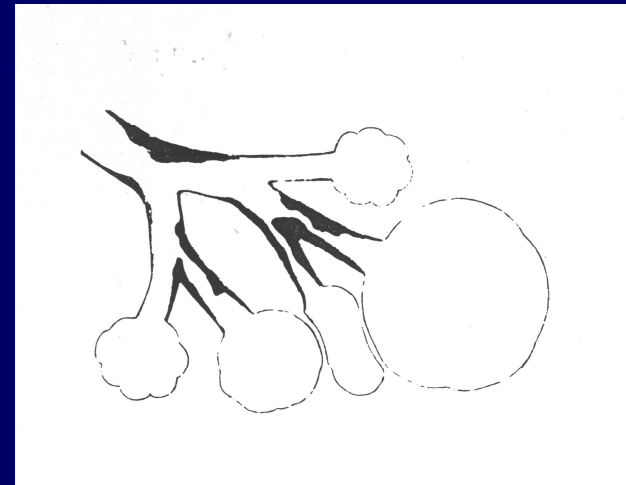


$$\begin{aligned}C_1 &= C_2 \\Tc_1 &= Tc_2 \\Vt_1 &= Vt_2\end{aligned}$$



$$\begin{aligned}C_1 &< C_2 \\Tc_1 &> Tc_2 \\Vt_1 &< Vt_2\end{aligned}$$

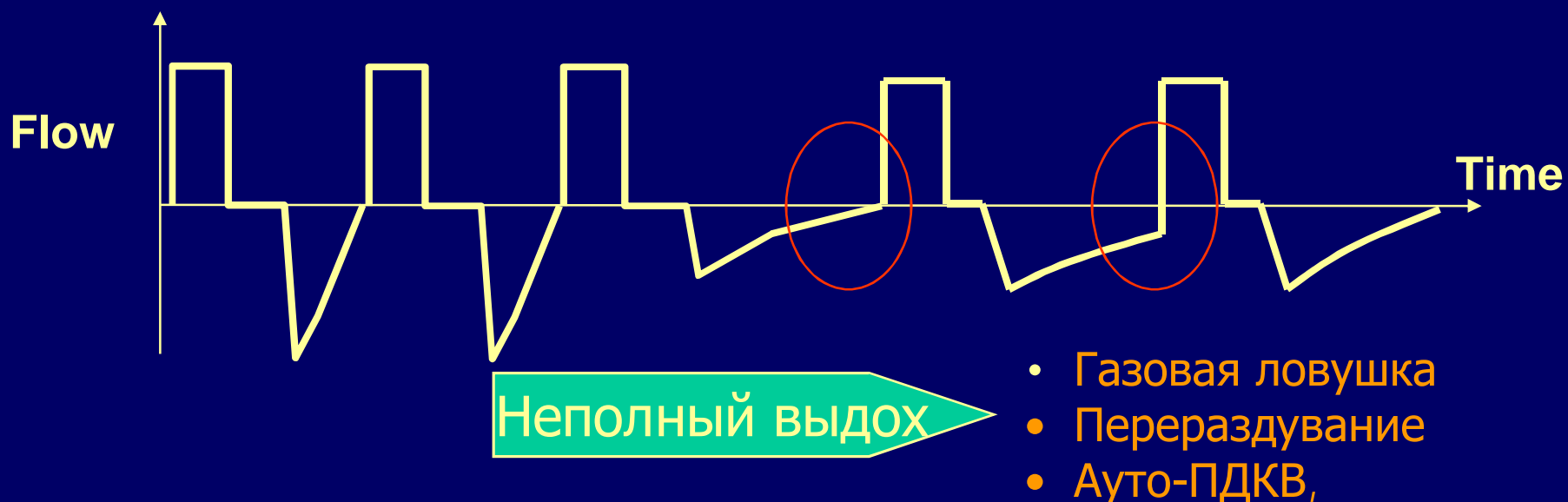
Обструкция = 1:2 - 1:4



Оптимизация времени выдоха

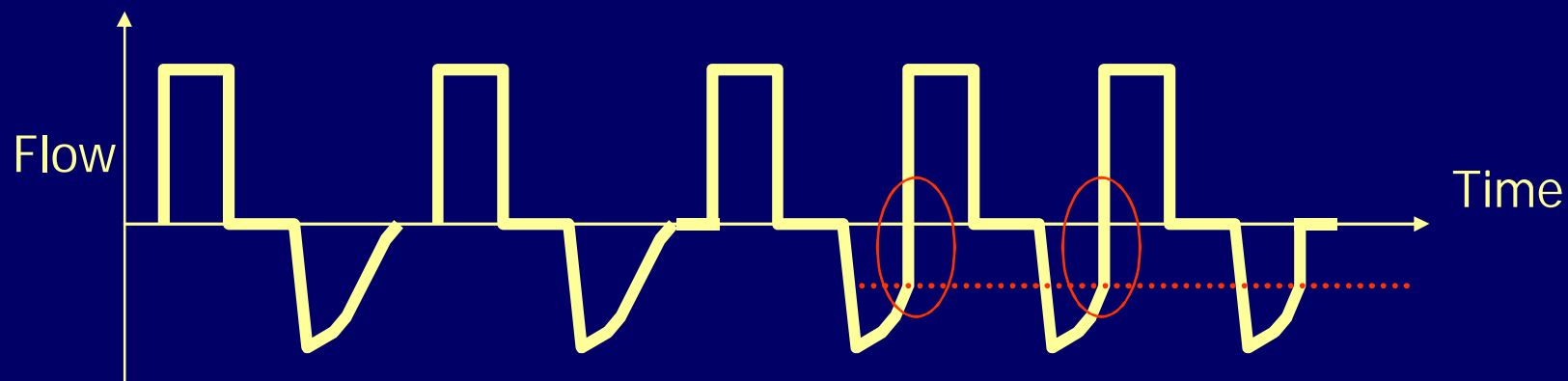
Замедление потока на выдохе является патогномичным СИМПТОМОМ

- бронхиальной обструкции,
- бронхоспазма
- нарушения проходимости экспираторного клапана аппарата



Избыточное время вдоха или недостаточное время выдоха

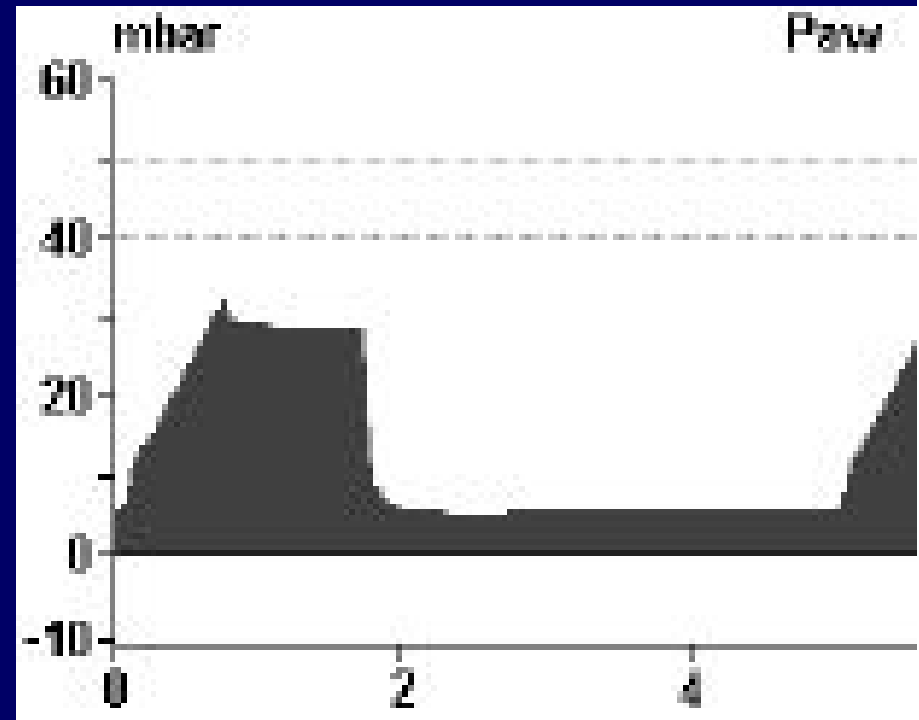
- Кривая экспираторного потока не возвращается на изолинию к началу следующего дыхательного цикла.



- Может увеличивать работу дыхания
- Увеличивает MAP и усиливает гемодинамические последствия ИВЛ
- Приводит к динамическому перераздуванию альвеол, формированию ауто-ПДКВ

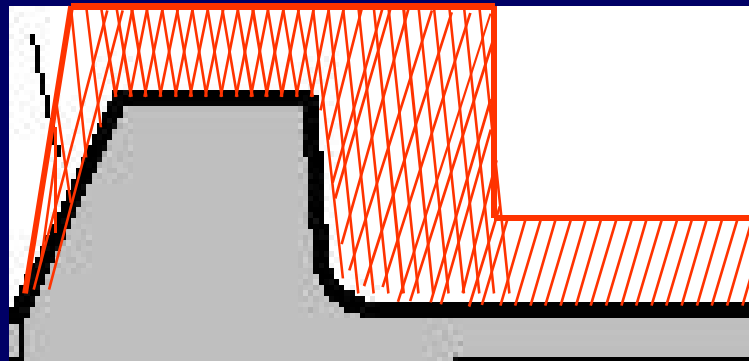
Давление в дыхательных путях

- Ограничение давления
- Давление вдоха
- Давление паузы
- Давления выдоха
- Среднее давление



Факторы, влияющие на MAP

- Давление вдоха
- РЕЕР
- Инспираторный поток
- Время вдоха

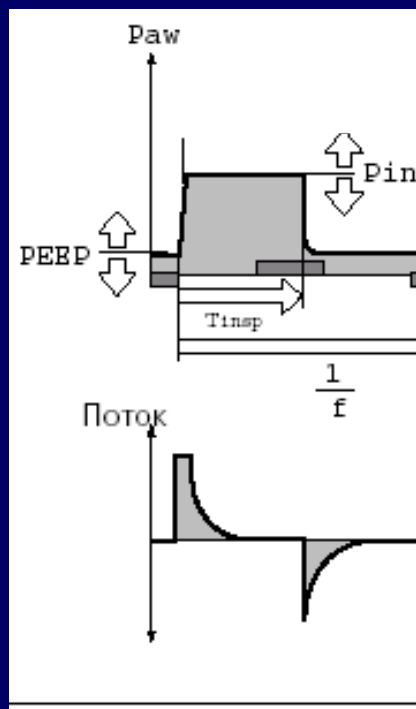


Инспираторное давление (P_{in} , P_{IP} , Peak Pressure, P_{max})

- Пределы «нормы» (P_{in}) = 15-22 мбар
- Пределы безопасности (P_{max}) = 35-45 мбар

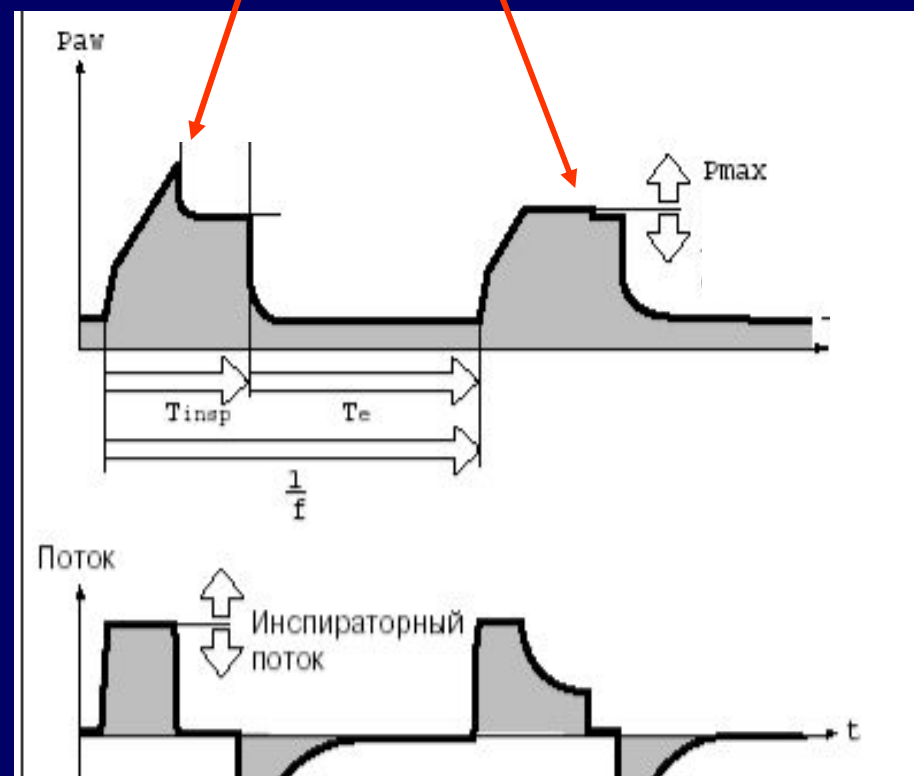
Pressure control

Peak Pressure, P_{in}

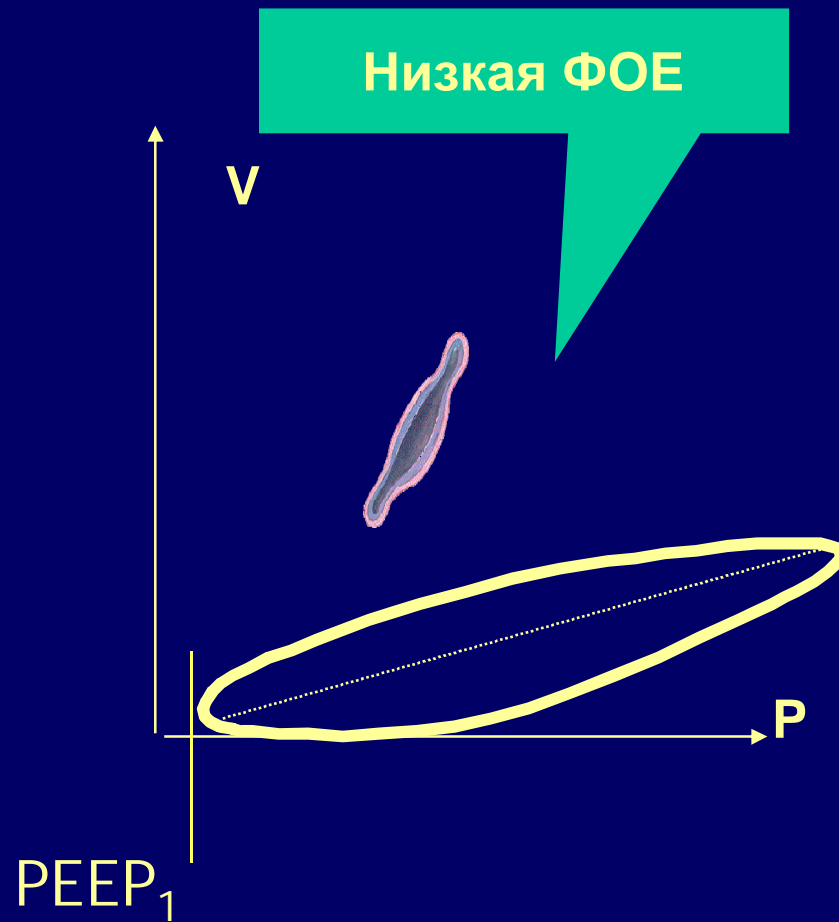


Volume control, Pressure limit

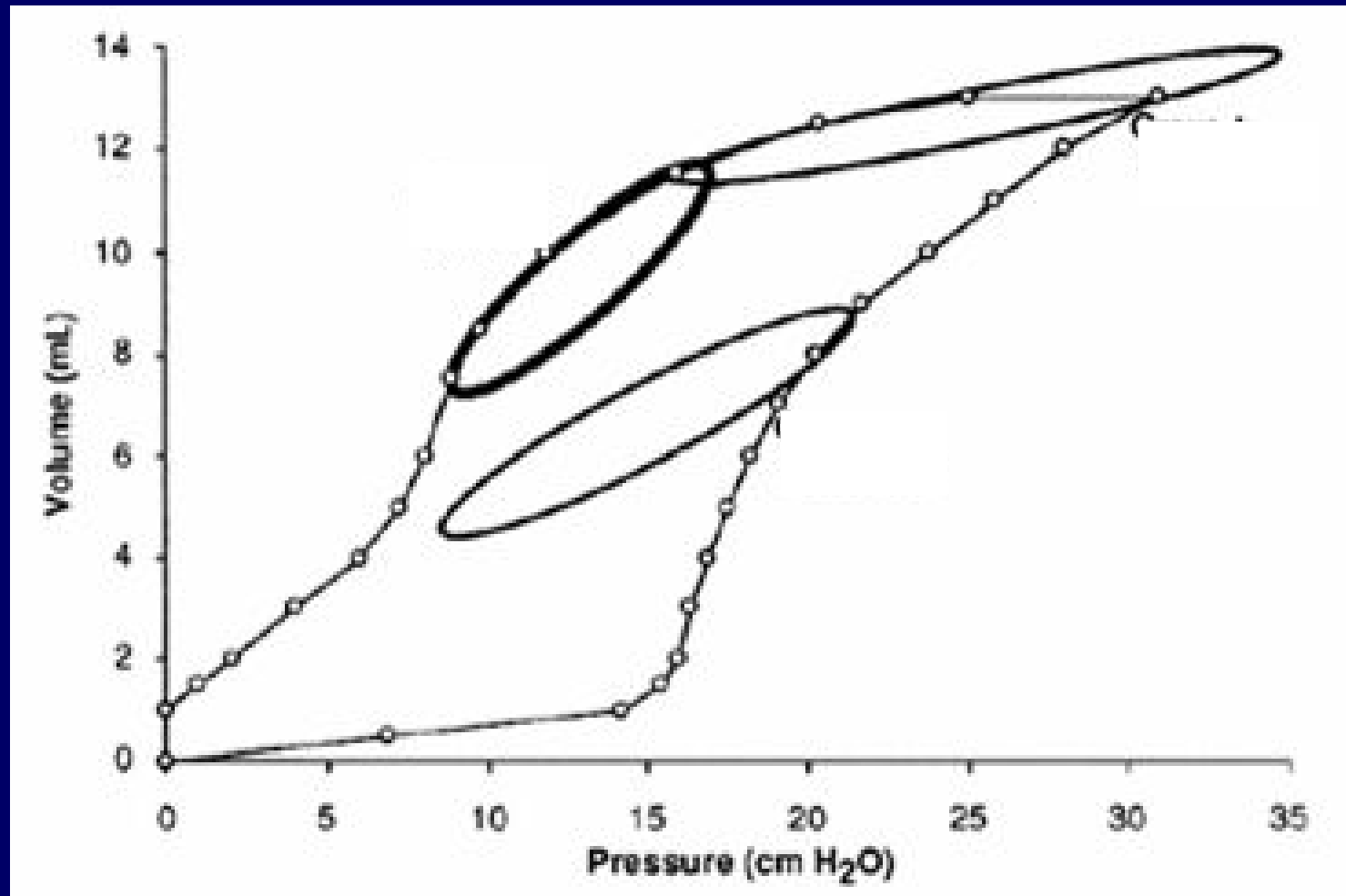
P_{in} , P_{max} , P_{limit}



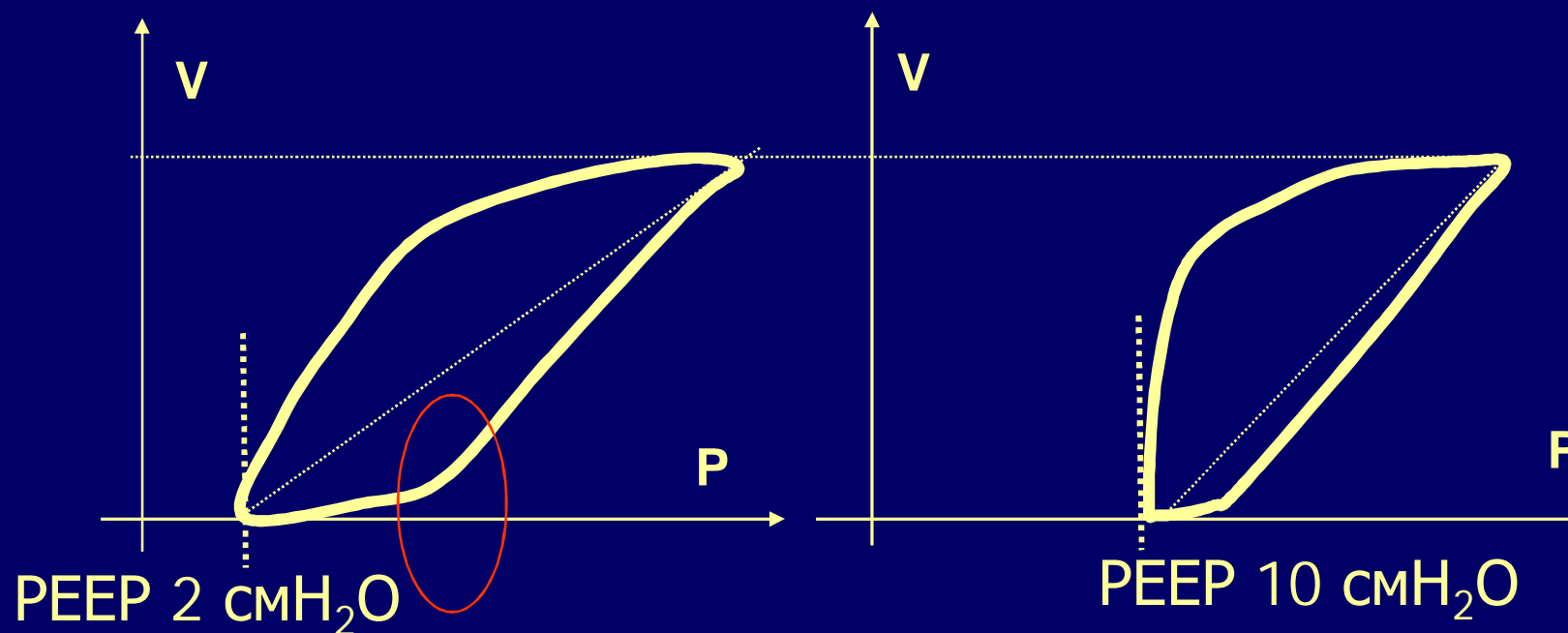
Выбор уровня РЕЕР



Выбор уровня РЕЕР

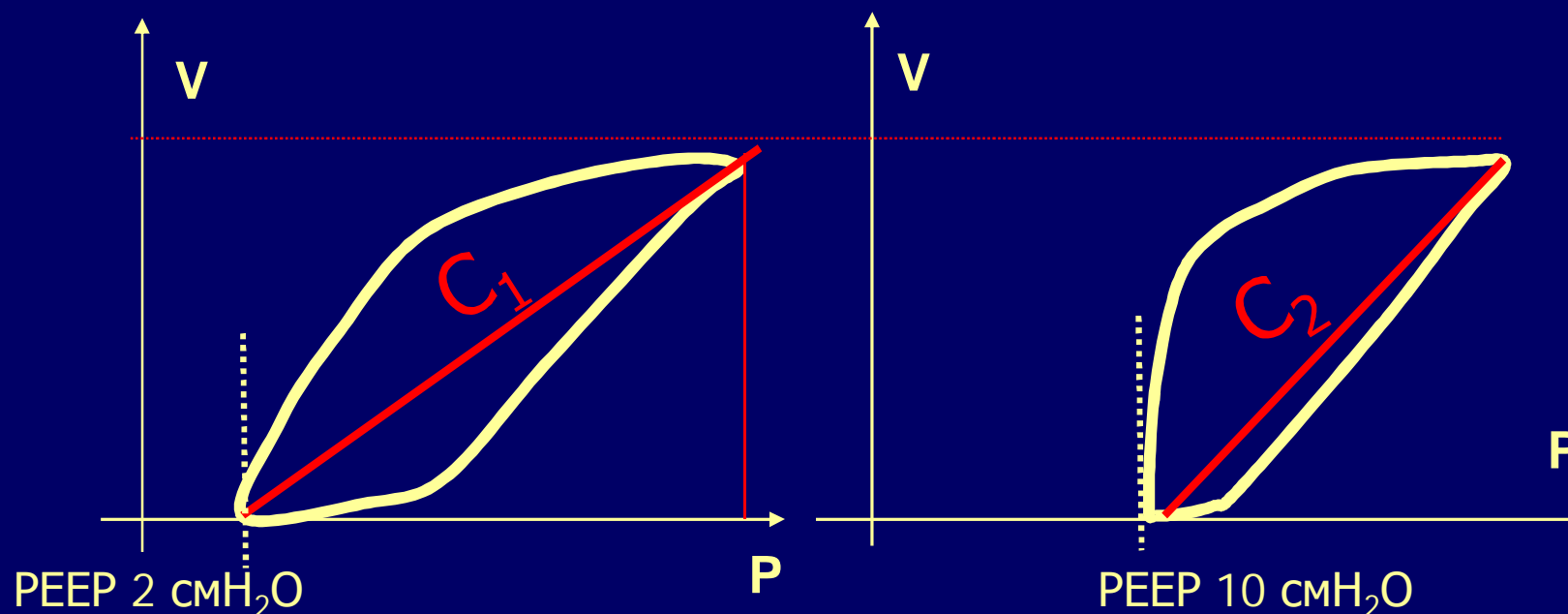


Выбор уровня РЕЕР



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

Выбор уровня РЕЕР

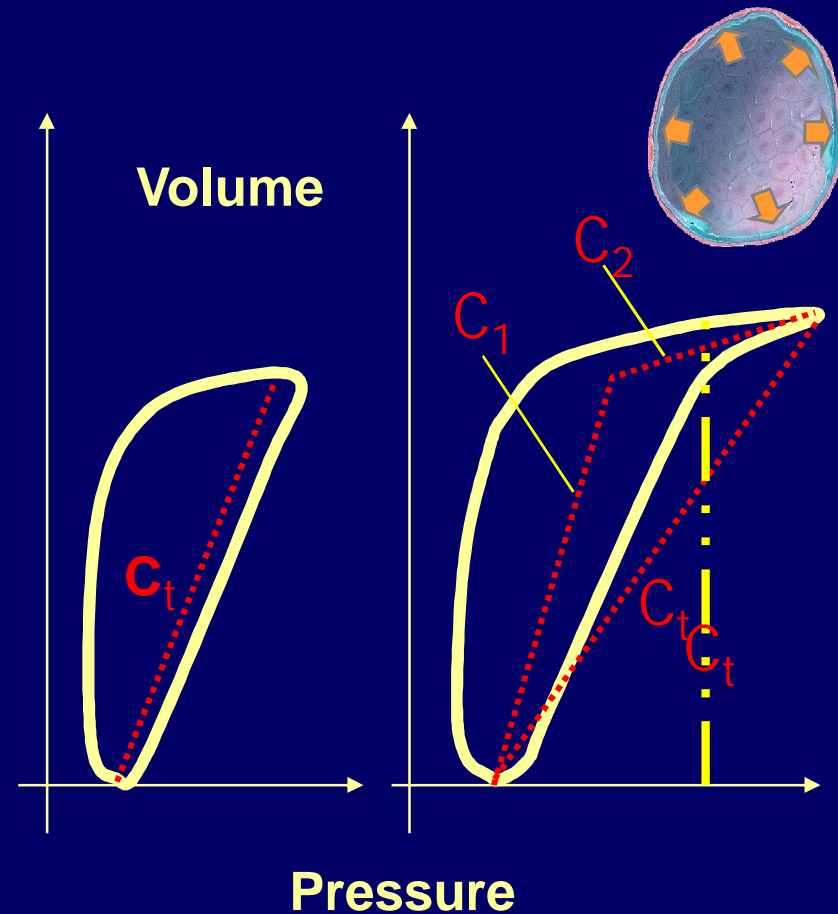


Best PEEP – уровень ПДКВ, обеспечивающий:

- Максимальную величину комплайенса
- Наилучший уровень оксигенации при наименьшем значении FiO_2

Перераздувание альвеол

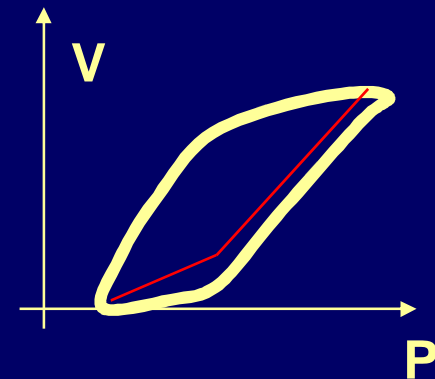
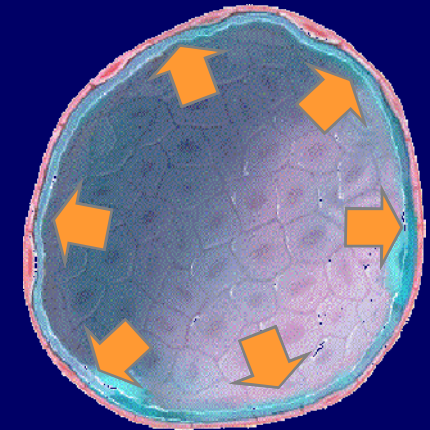
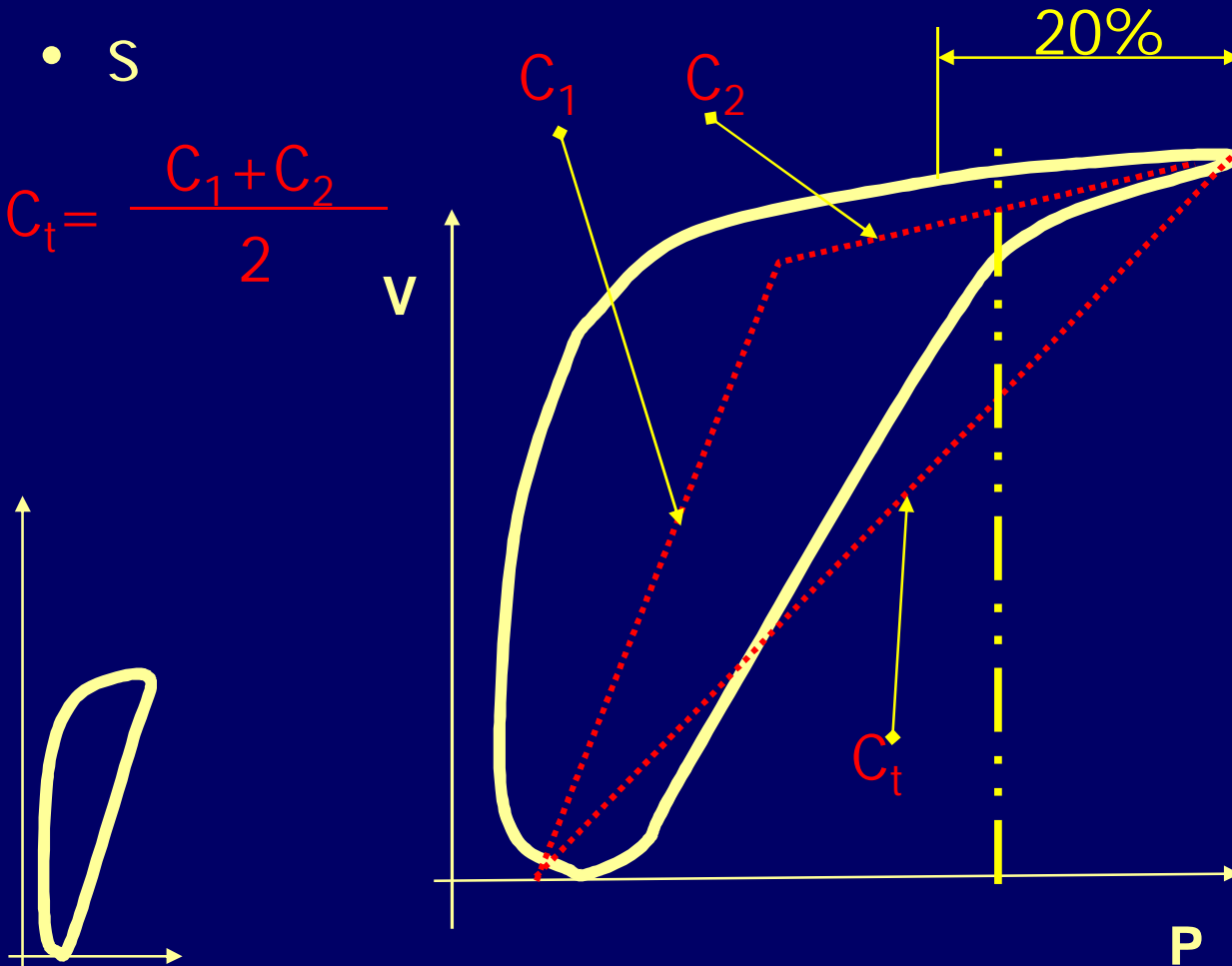
- Перераздувание имеет место когда лимит объема для легкого или его компонентов превышен
- Когда в конце вдоха снижается compliance
- Когда на петле V/P в конце вдоха наблюдается «клюв»



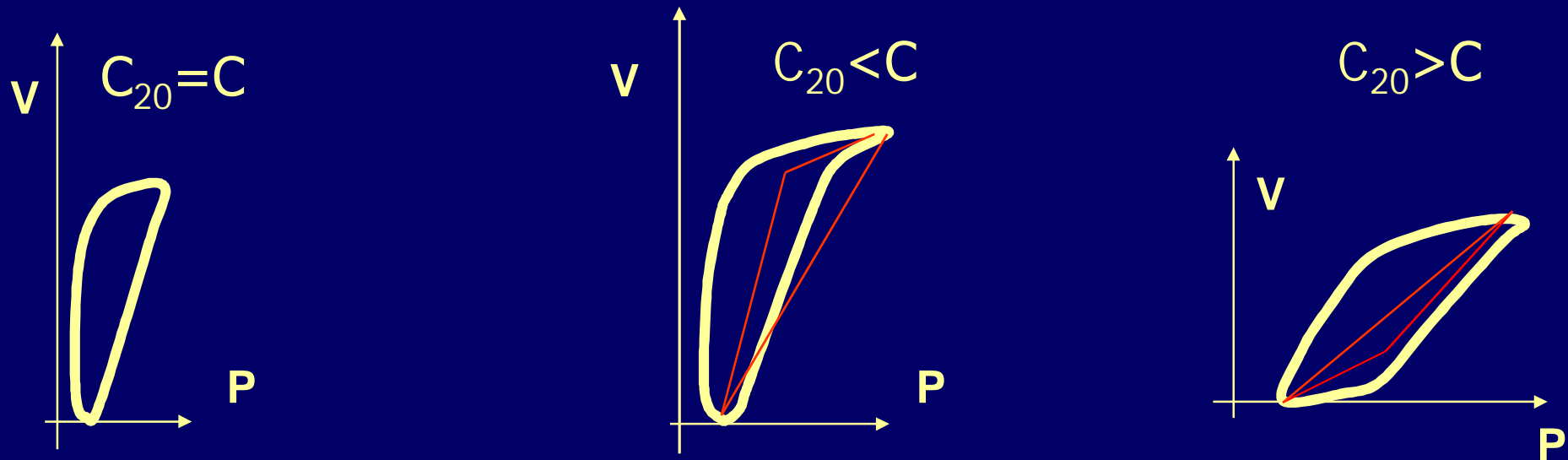
Перераздувание альвеол и C_{20}/C

• S

$$C_t = \frac{C_1 + C_2}{2}$$



Перераздувание альвеол и C_{20}/C



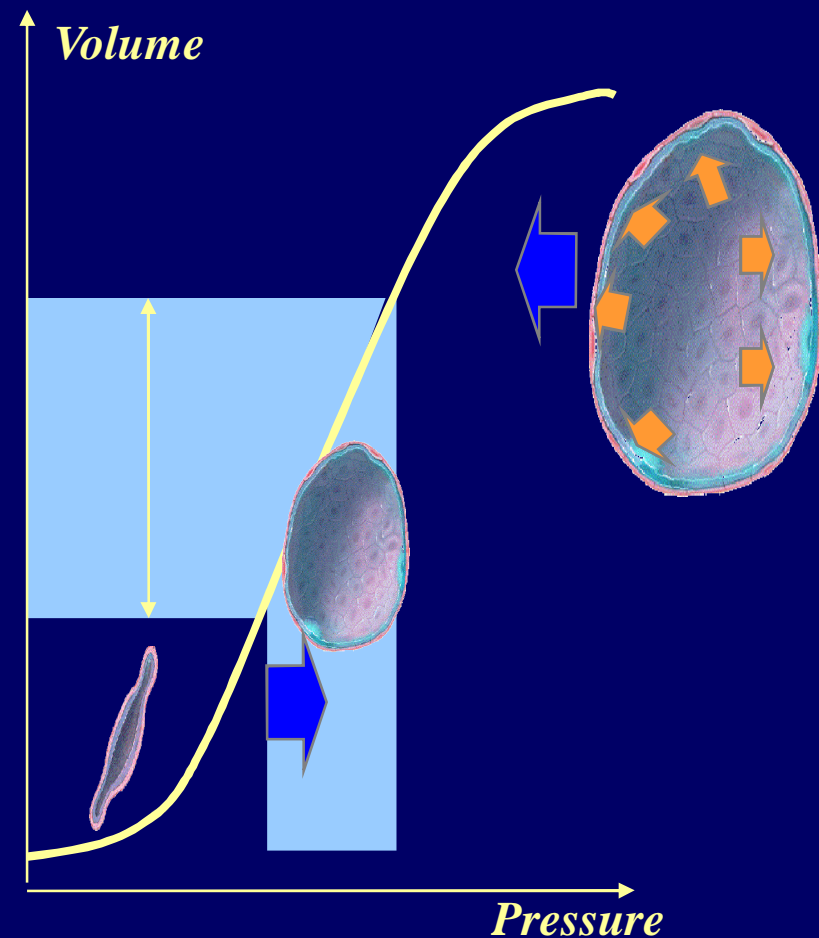
$$C_{20}=C \rightarrow C_{20}/C=1$$

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

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

Профилактика VILI

1. **Установка P_{plat} ниже уровня «клюва»**
2. **Использование минимально-достаточного V_t для предотвращения перераздувания**
3. **Установка РЕЕР на уровне нижней точки раскрытия (протектирование ФОЕ)**



Дыхательный объем

- Инспираторный
- Экспираторный
- Объем утечки из контура (%)

Параметры мониторинга при ИВЛ

- Мониторинг вентиляции:
 - Дыхательный объем (T_v)
 - Минутный объем вентиляции (MV)
 - Частота (спонтанная и принудительная)
 - → эффективность выделения CO_2
(pCO_2 , $EtCO_2$, VCO_2)
- Мониторинг оксигенации
 - Цвет кожи
 - Пульсоксиметрия, pO_2
- Мониторинг состояния респираторной механики

Дополнительные параметры мониторинга при ИВЛ

- Ауто РЕЕР
- Compliance
- Resistance
- Time constant

Ауто РЕЕР

Intrinsic РЕЕР – фактическое давление в легких в конце выдоха

- В большинстве аппаратов измеряется вручную и указывает на величину РЕЕР_i и остаточного объема (V_{trap}) в дыхательной системе.
- Возникает из-за неравномерности механических свойств легких, недостаточного времени выдоха
- Способствует увеличению альвеолярного МП, и развитию волюм-индуцированного повреждения
- В "норме" РЕЕР_i=РЕЕР, $V_{trap}=0$

Вентилятор-индуцированное повреждение легких (VILI)*

- Риск ателектазирования (atelectrauma)
- Баротравма/риск баротравмы
- Волюмтравма
- Биотравма

Вентилятор-индуцированное повреждение легких (VILI)*

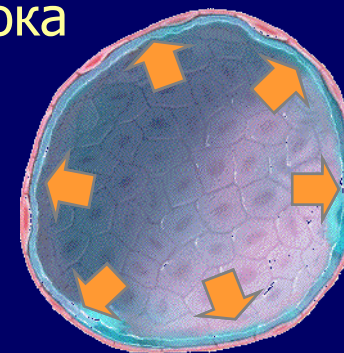
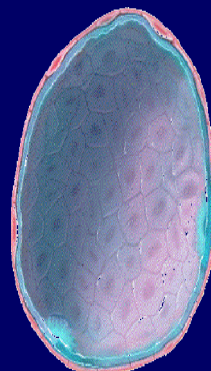
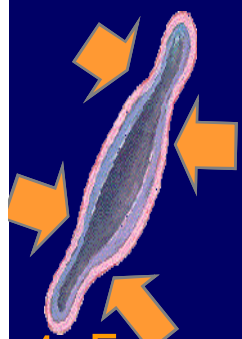
1. Риск ателектазирования (atelectrauma)

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

2. Баротравма/риск баротравмы:

Перераздутие нормально-аэрируемых альвеол в результате избыточного давления

Нарушение легочного кровотока



4. Биотравма:

Аутоповреждение медиаторами воспаления

Экспрессия генов ответственных за апоптоз

3. Волюмтравма:

Нарушение выдоха, обусловленное обструкцией → аутоPEEP → перерастяжение

*Dreyfuss: J Appl Physiol 1992