

Волюметрическая капнография: основные аспекты

О.Е. Сатишур, к.м.н.

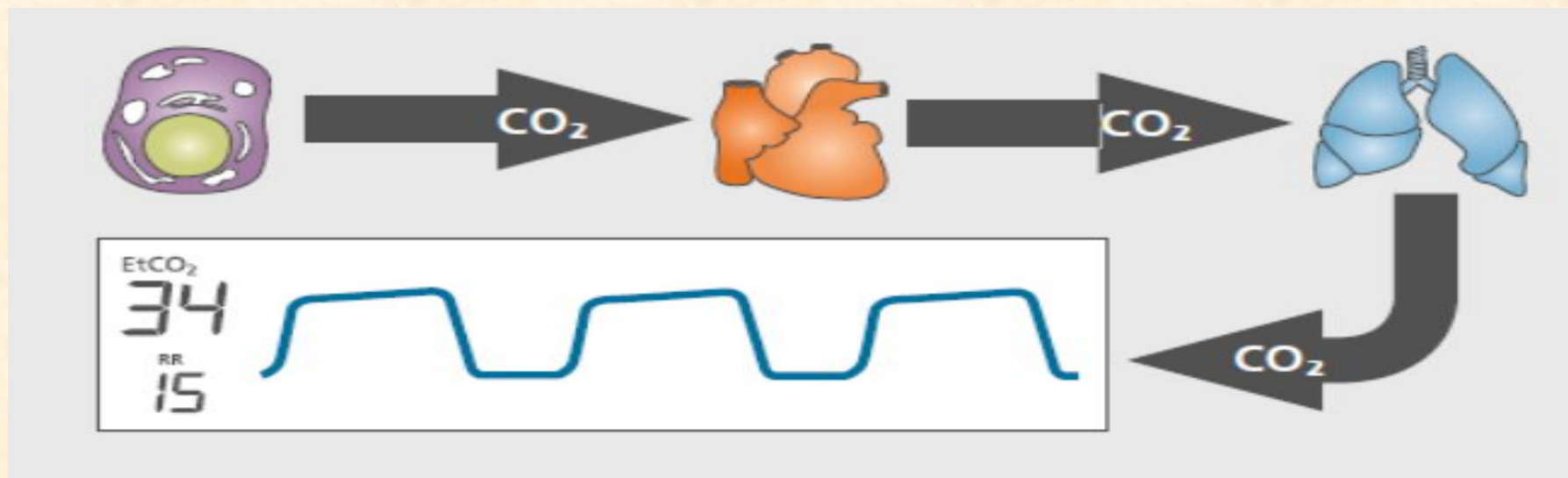
БСМП г. Минска (Беларусь)

Капнография как мера вентиляции

Метаболизм

Транспорт

Вентиляция

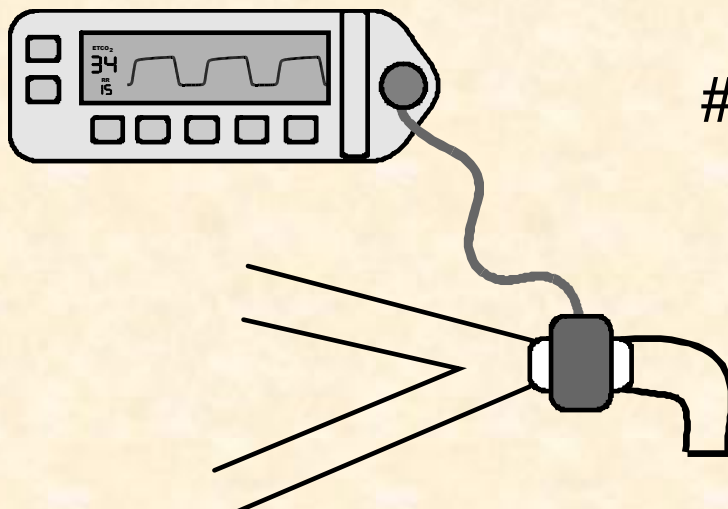


PetCO₂ зависит от альвеолярного CO₂

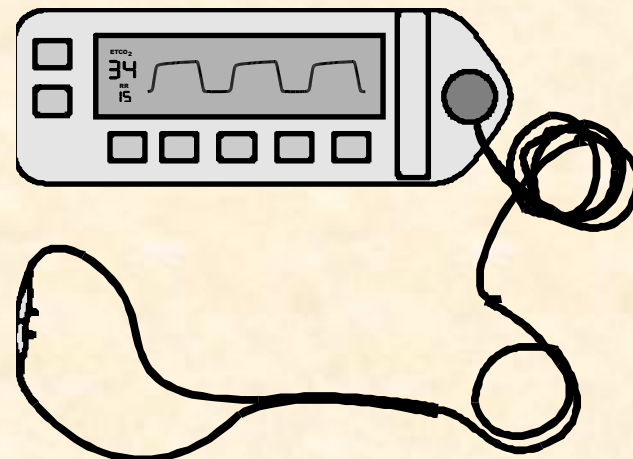
Капнография: Технология измерения

Принцип поглощения инфракрасного излучения

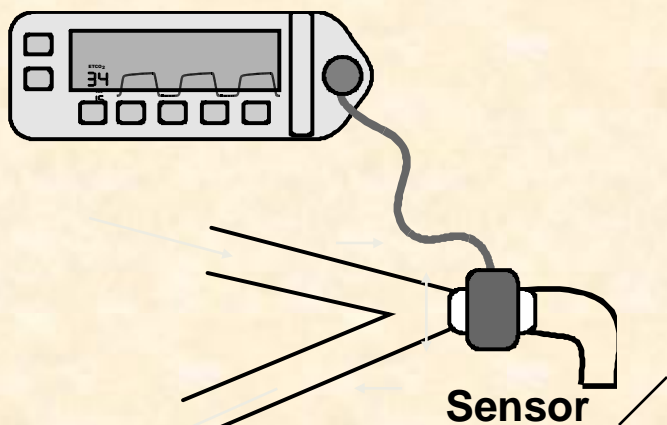
В основном потоке (mainstream)



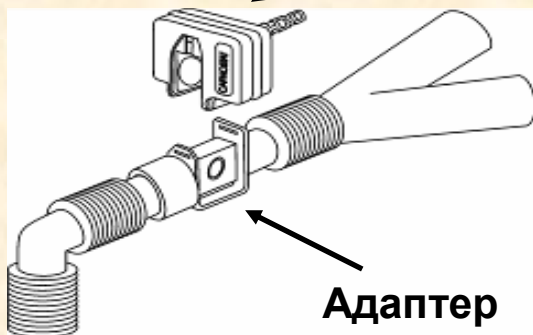
В боковом потоке (sidestream)



Капнография в основном потоке



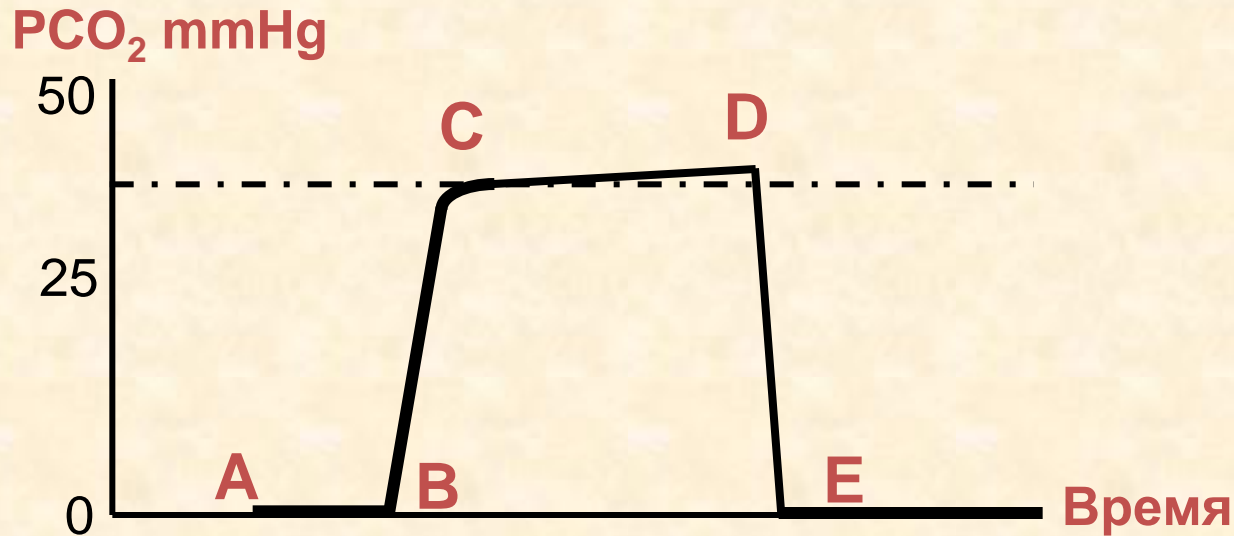
Датчик



Адаптер

- ◆ Датчик расположен непосредственно в дыхательном контуре
- ◆ Измерения непосредственно у пациента
- ◆ Более быстрое время ответа
- ◆ Нет необходимости в линии отбора проб и влагосборнике
- ◆ Возможность волюметрической капнографии

Стандартная капнограмма (PCO₂ – время)



- A-B** Начало выдоха (CO₂ из крупных дыхательных путей)
- B-C** Выдох из более мелких дыхательных путей, быстрый подъем концентрации CO₂
- C-D** Альвеолярное плато, CO₂ в воздухе, который подвергался газообмену
- D** **etCO₂** – CO₂ в конце выдоха, коррелирует с PaCO₂ (при отсутствии нарушений V/Q)
- D-E** Начало вдоха, CO₂ быстро снижается

Стандартная капнография: значение

Основной параметр - P_{CO_2} в конце выдоха ($P_{et}CO_2$)

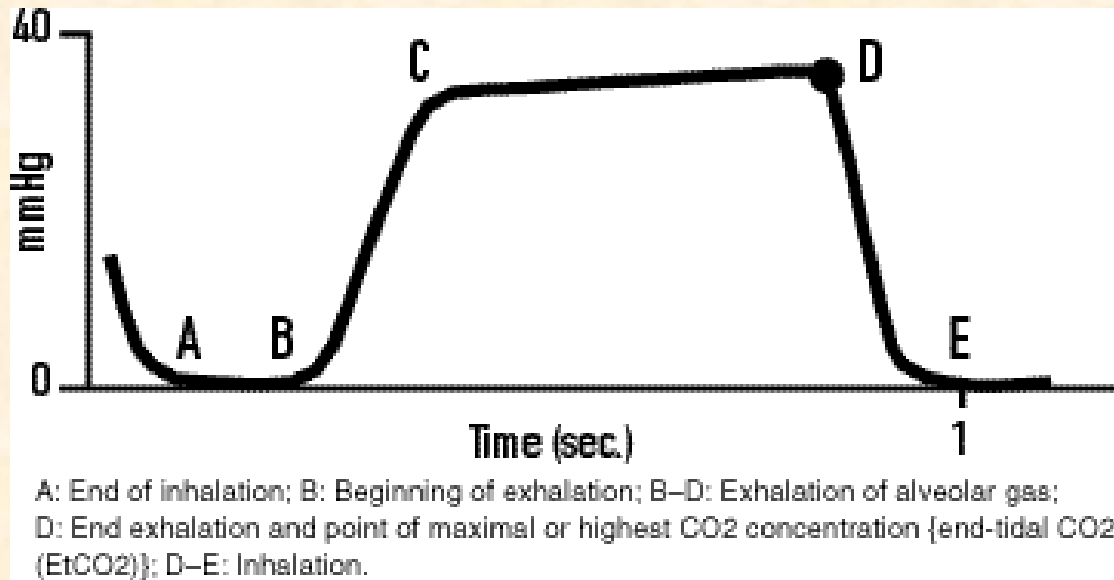
$$P_{et}CO_2 \approx P_aCO_2$$

Градиент $P_aCO_2 - ETCO_2$ в основном 4-5 mmHg
(при стабильной перфузии)

E_tCO_2 :

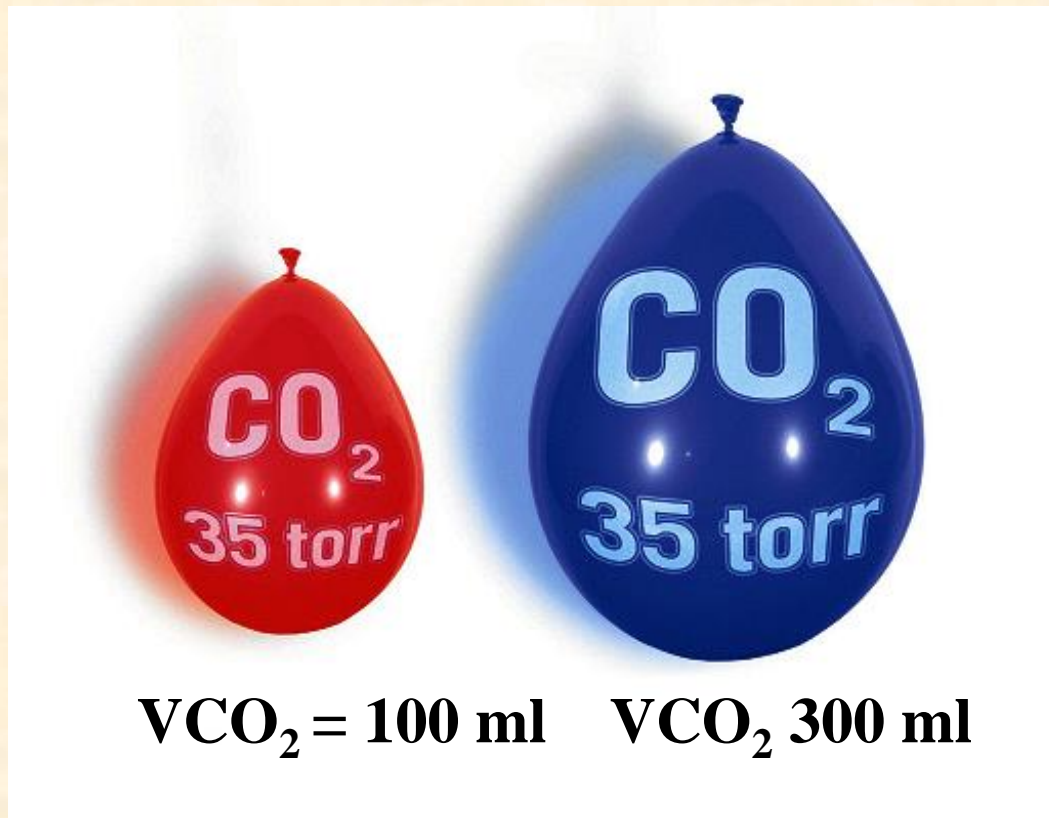
- Оценка минутного объема вентиляции (нормо-, гипо-, гиперкапния);
- Косвенная оценка эффективности кровообращения и реанимационных мероприятий;
- Верификация интубации трахеи (пищевода) ?
- Капнограмма

Капнография PCO_2 -время: недостатки



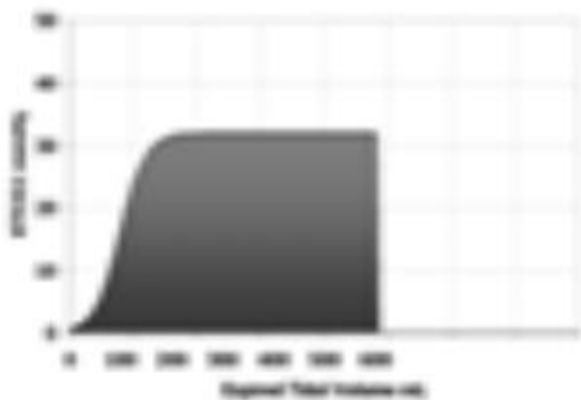
- CO_2 в конце выдоха может не отражать уровень альвеолярного CO_2
- Нет информации по объемному содержанию CO_2
- Недостаточная информация по в-п соотношениям
- Форма капнограммы может не зависеть от глубины и/или эффективности внешней вентиляции

Волюметрическое измерение CO_2

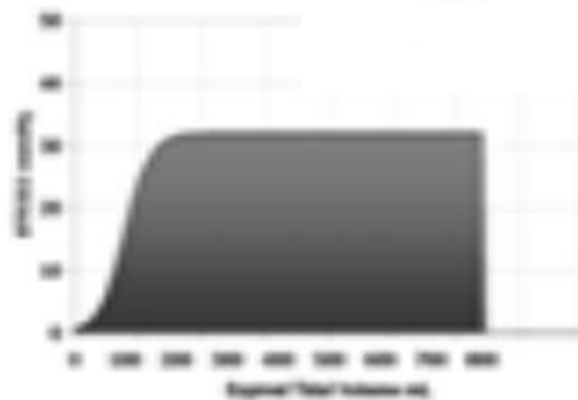


Волюметрическое измерение CO₂

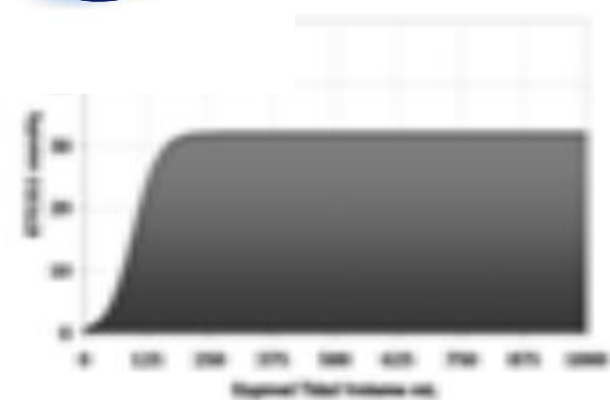
Позволяет рассчитать объемные характеристики CO₂, а не только давление



EtCO₂ = 32
V_t = 600 ml
VCO₂ = 50 ml/min



mmHg EtCO₂ = 32 mmHg
V_t = 800 ml
VCO₂ = 200 ml/min

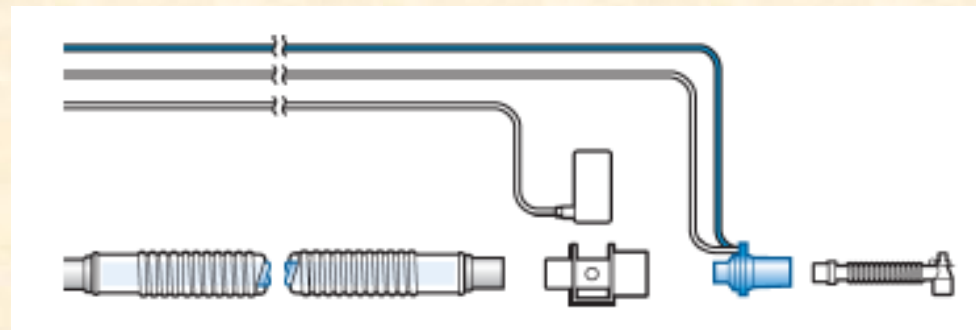


EtCO₂ = 32 mmHg
V_t = 1000 ml
VCO₂ = 300 ml/min

Волюметрическая капнография: получение данных



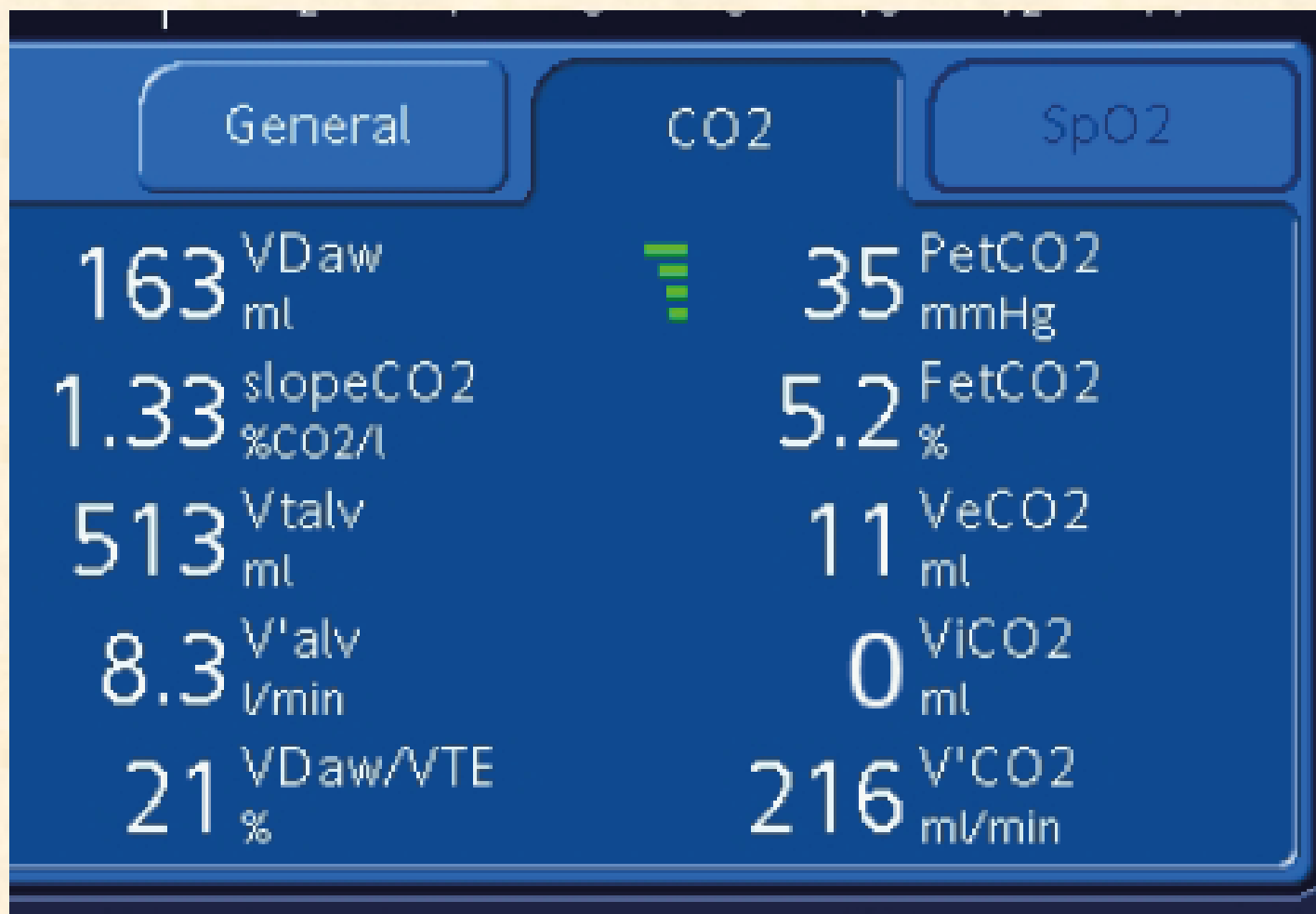
Датчик CO_2 в прямом потоке и проксимальный потоковый датчик: одновременное измерение CO_2 и потока непосредственно возле пациента



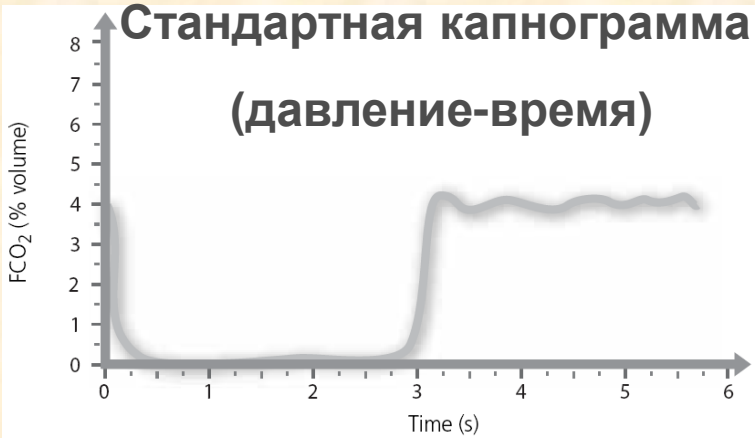
Волюметрическая капнография: кривые и параметры

- Волюметрическая капнографическая кривая PCO_2-Vt
- 10 цифровых мониторируемых параметров:
 - $P_{et}CO_2$ [mmHg] – парциальное давление CO_2 в конце выдоха
 - $F_{et}CO_2$ [%] - концентрация CO_2 в конце выдоха
 - $V_{e}CO_2$ [ml] - объем CO_2 на выдохе
 - $V_{i}CO_2$ [ml] - объем CO_2 на вдохе
 - $V'CO_2$ [ml/min] – минутная продукция CO_2
 - V_{Daw} [ml] – объем мертвого пространства
 - V_{Daw}/V_{TE} [%] – соотношение мертвого пространства к ДО
 - V_{talv} [ml] – альвеолярный ДО
 - V'_{alv} [l/min] – минутный альвеолярный объем
 - $SlopeCO_2$ [% CO_2/l] – степень наклона кривой плато

Волюметрическая капнография: параметры на экране



Волюметрическая капнография: интеграция CO_2 и потока (PCO_2 – объем)

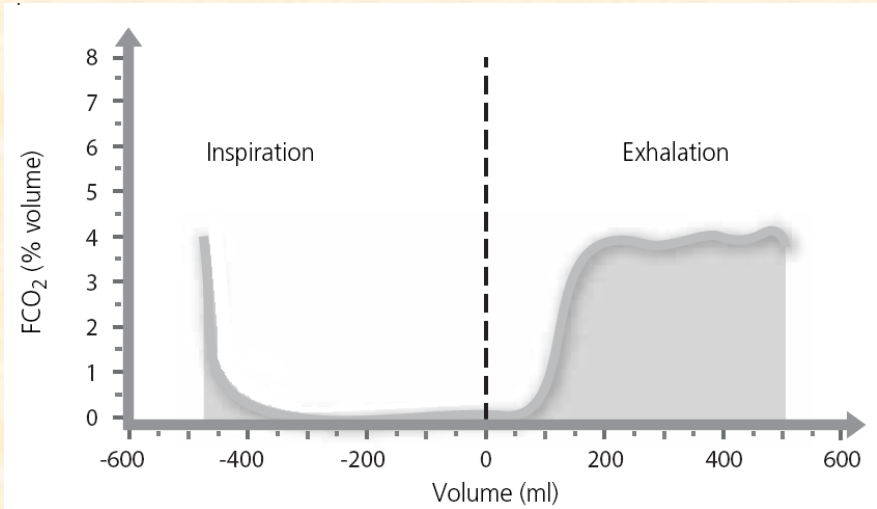


+

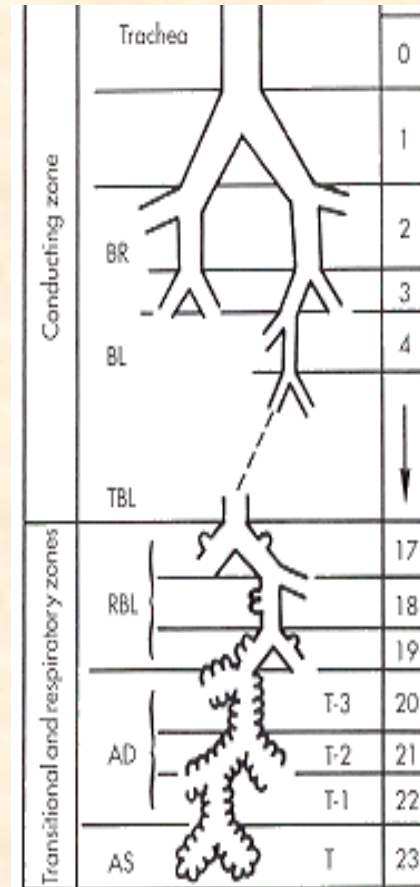
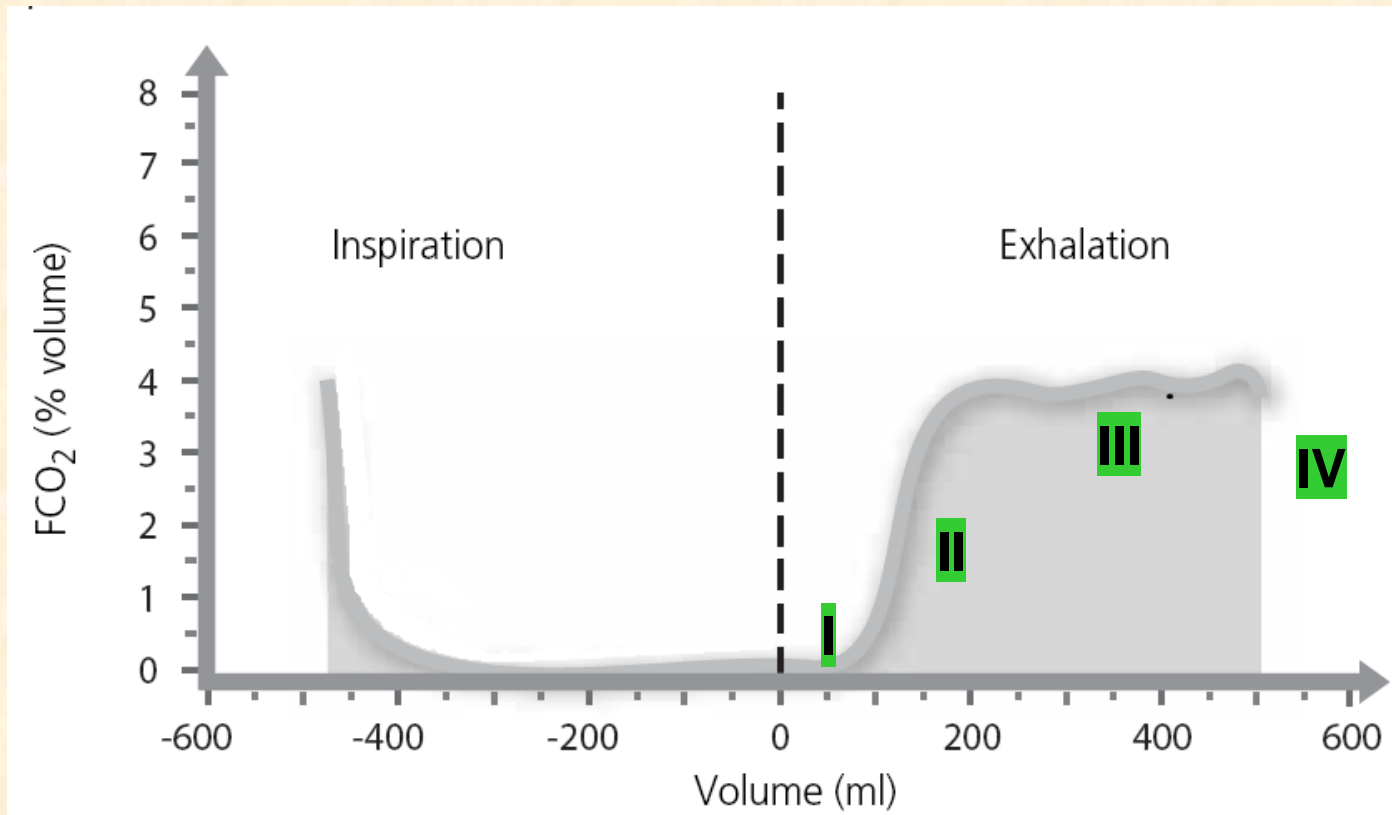
=



Волюметрическая капнограмма



Фазы воллюметрической капнограммы



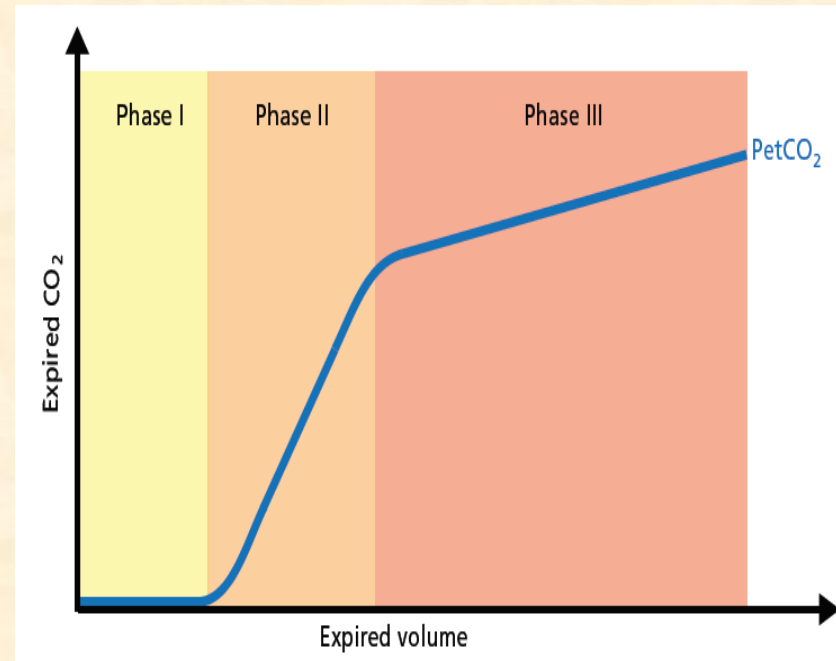
Фаза I = газ из крупных дыхательных путей

Фаза II = смешанный газ из нижних дыхательных путей и альвеол

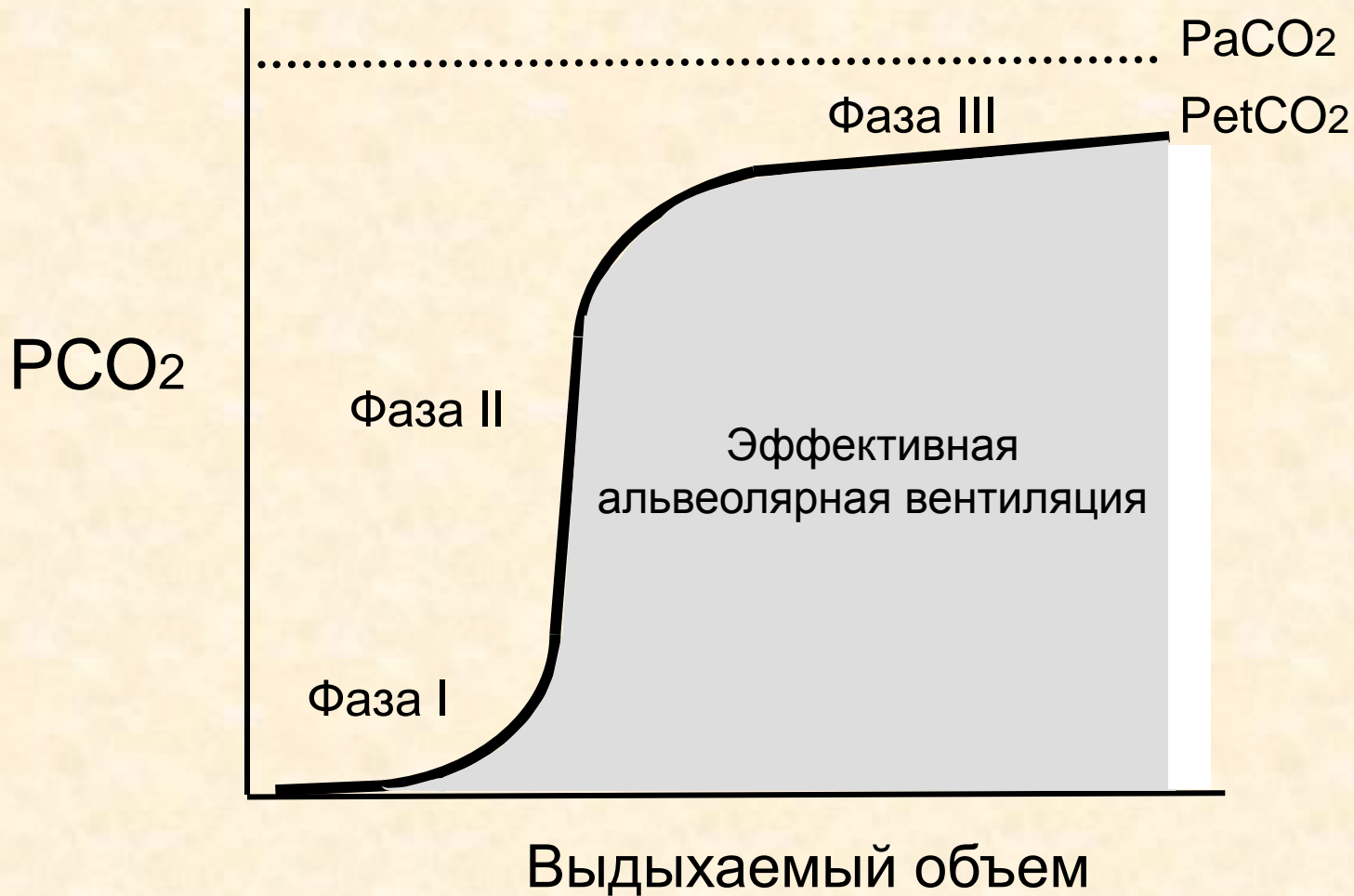
Фаза III = альвеолярный газ

Фазы волюметрической капнограммы: интерпретация

- фаза 1
 - ◆ отражает вентиляцию анатомического мертвого пространства (V_{DANA})
- фаза 2
 - ◆ V_{Dana} + легочная перфузия
- фаза 3
 - ◆ равномерность газораспределения и в-п соотношения



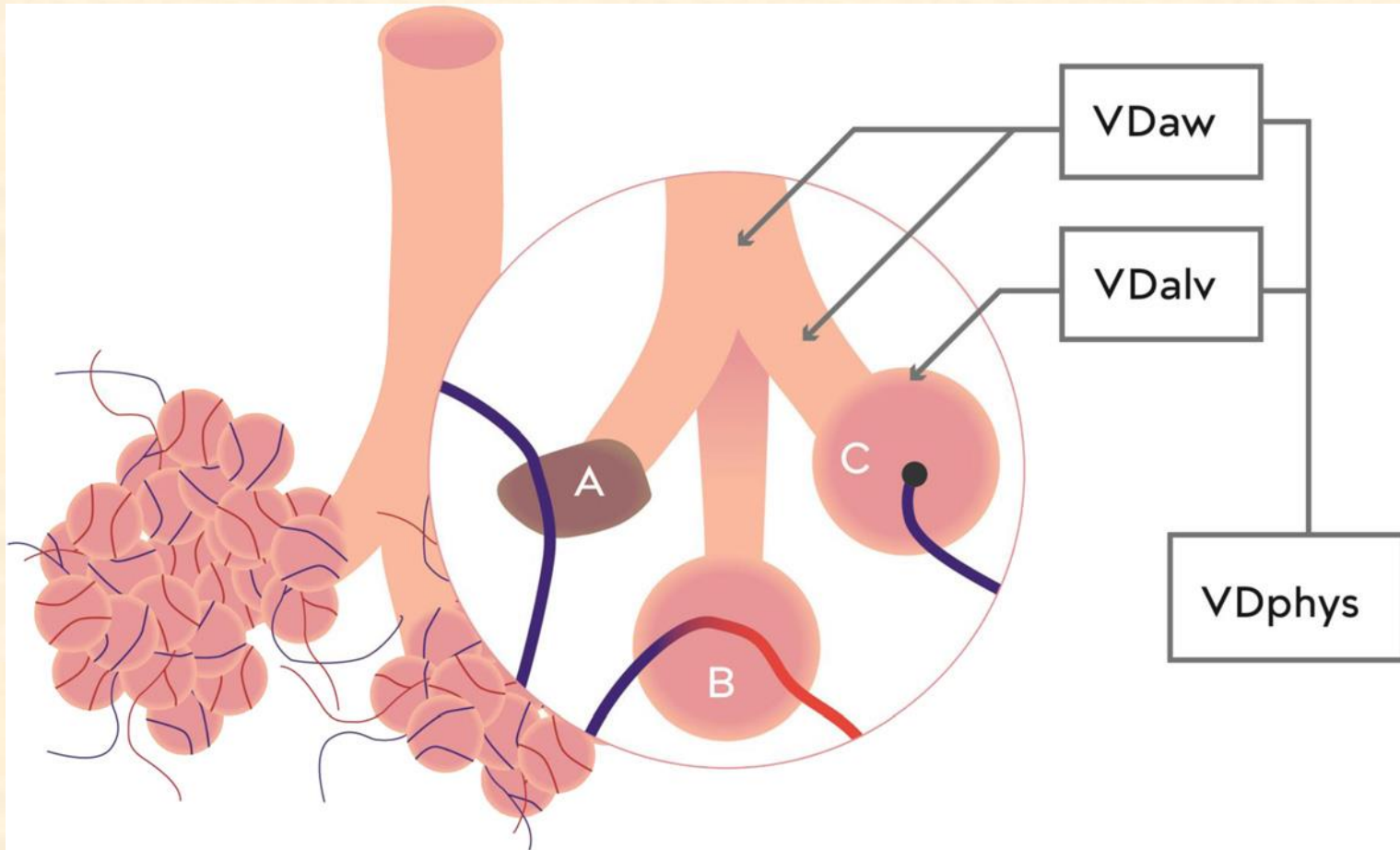
Волюметрическая капнограмма



R.Fletcher et al. Br J Anest 1981;53:77-88

L.Blanch et al. Minerva Anesthesiol 2006; 72: 577-85

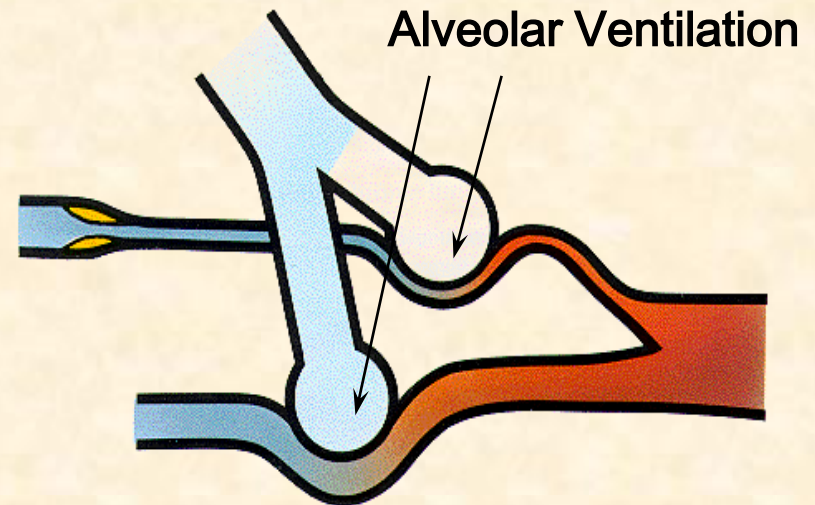
Мертвое пространство: анатомическое + альвеолярное
= физиологическое



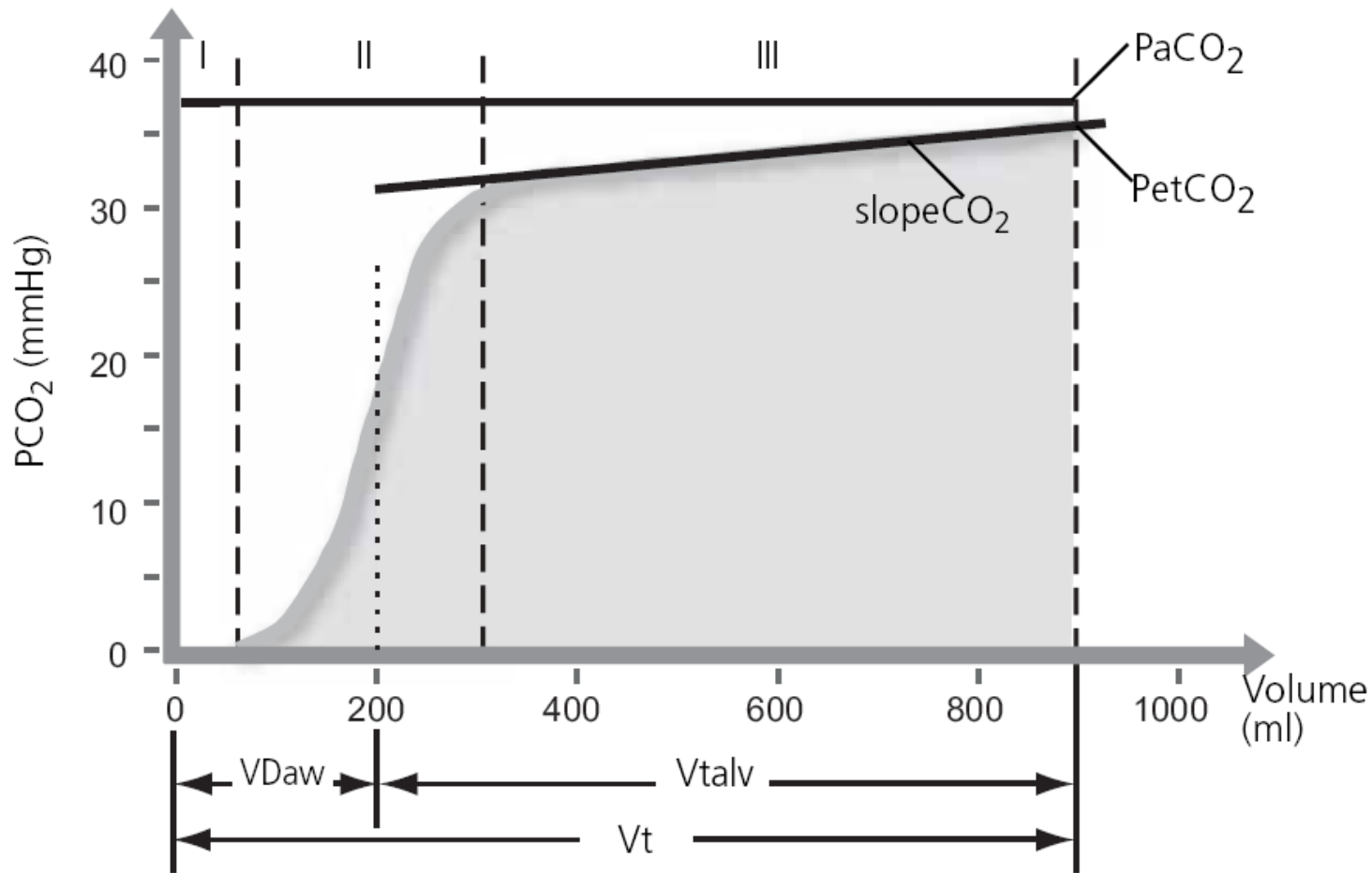
S.Verscheure et al. Crit Care 2016; 20: 184

Вентиляционно-перфузионное соотношение (V/Q)

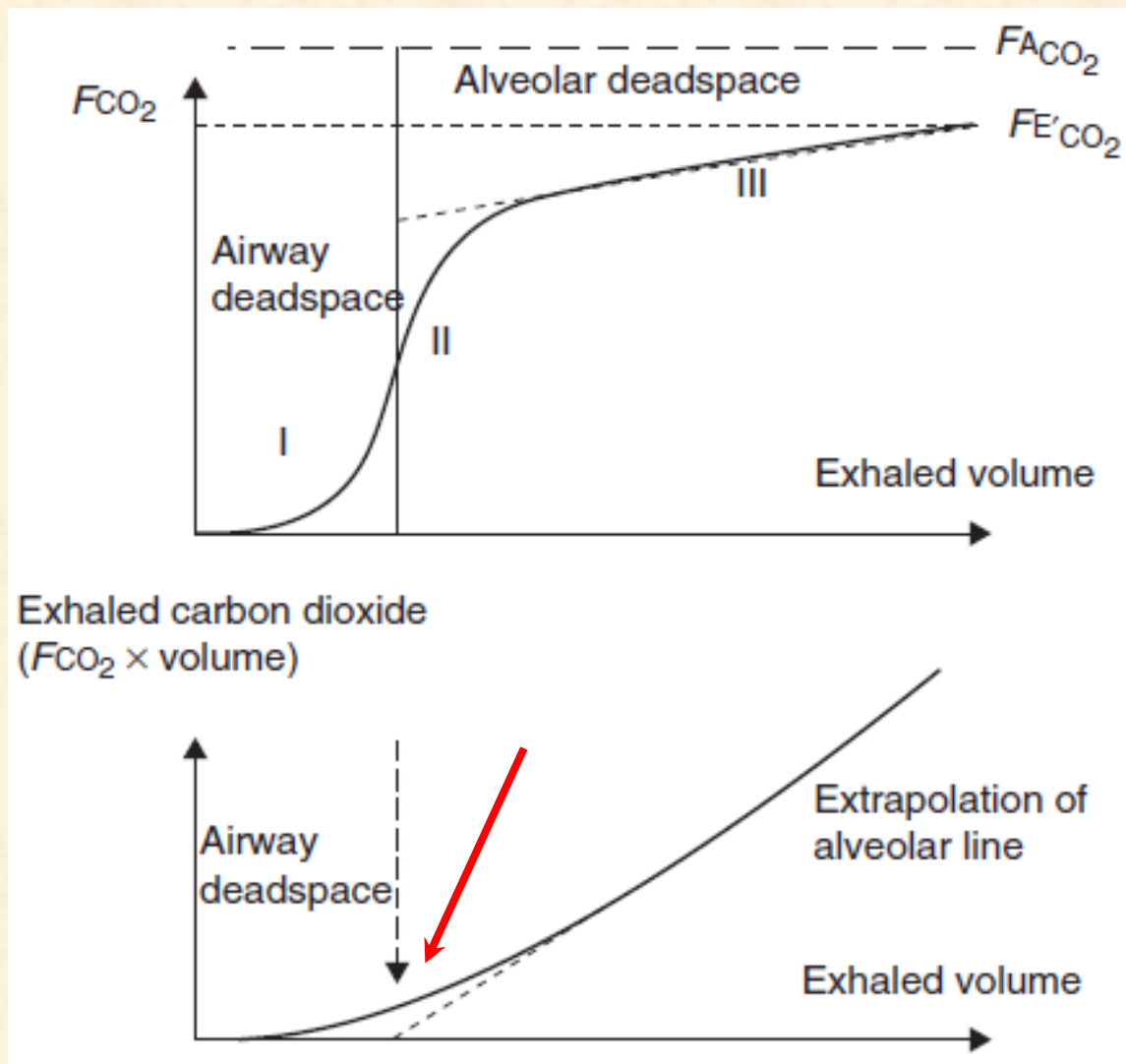
- В норме 0.7-0.8
- < 0.7 – ухудшение вентиляции по сравнению с перфузией
- > 0.9 – преимущественное ухудшение перфузии



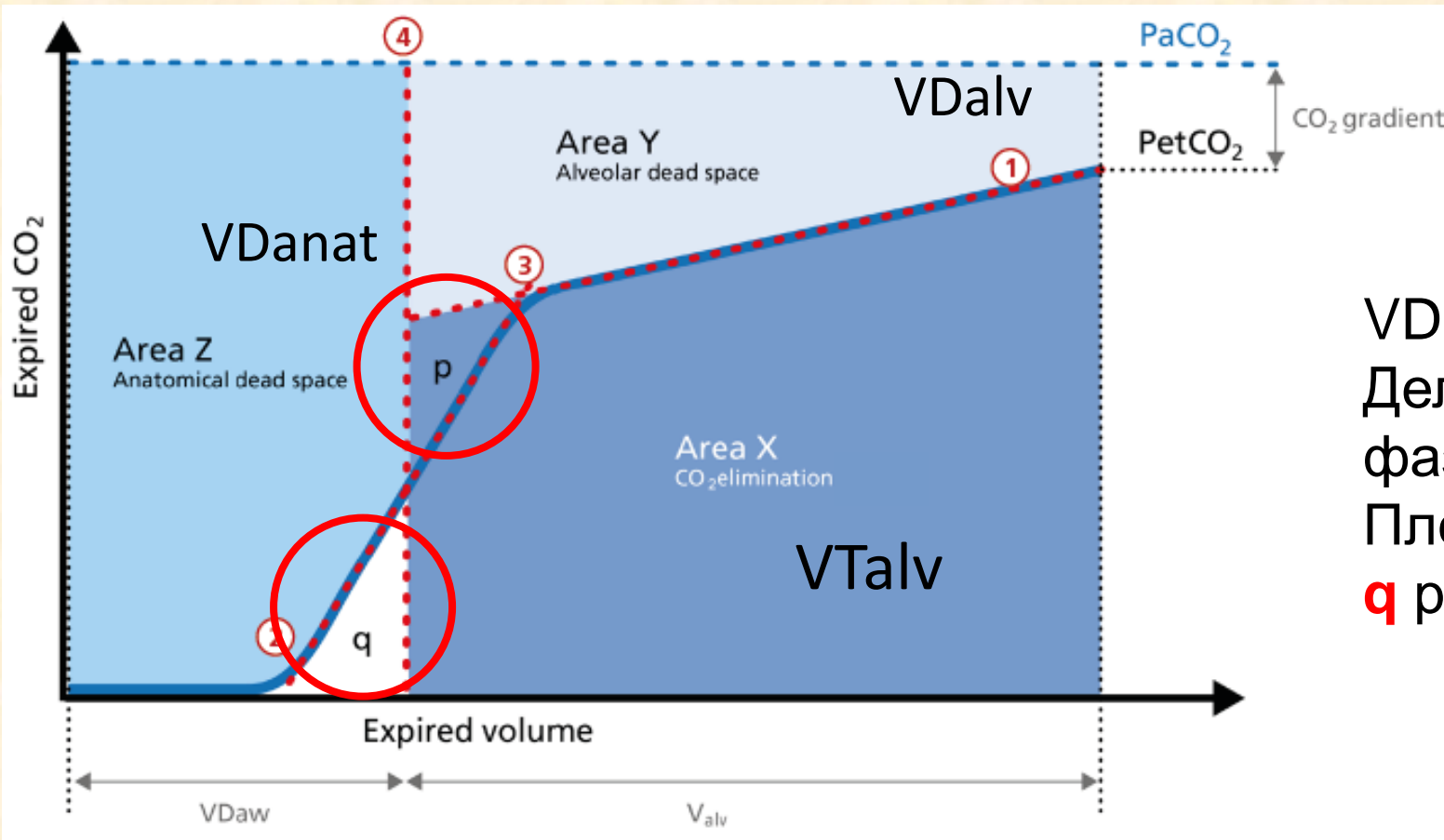
Волюметрическая капнография: фазы и величины V_T , V_{Daw} , V_{talv}



Когда начинается эффективное выделение CO_2 ?



Волюметрическая капнография и объемные зоны: V_{Dana} , $V_{T_{alv}}$, ($V_{D_{alv}}$)



V_{Dana} :
Деление II
фазы,
Площади **p** и
q равны

R.Fletcher et al. Br J Anest 1981;53: 77

G.Tusman et al. Anesth Analg 2012; 114: 866

Vd/Vt

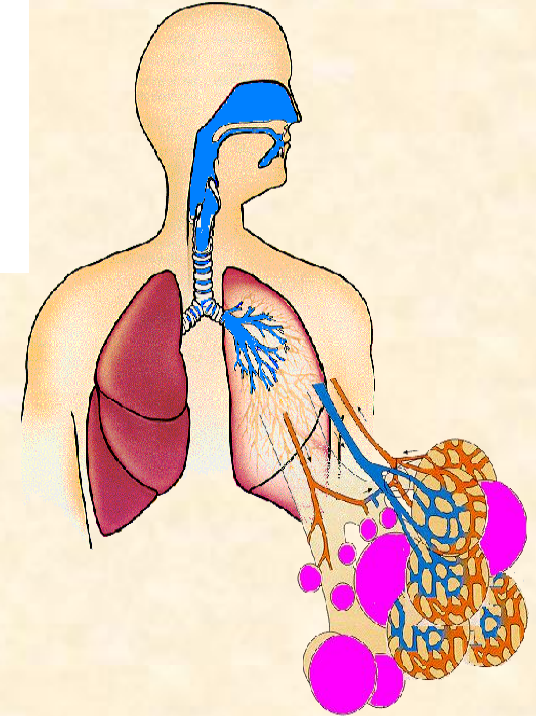
Intensive Care Med (2004) 30:576–579
DOI 10.1007/s00134-004-2194-8

PHYSIOLOGICAL NOTE

U. Lucangelo
L. Blanch

Dead space

- Отношение мертвого пространства (V_d) к дыхательному объему (V_t)
- Норма $\approx 0.25 - 0.35$
- Общая оценка эффективности и патологии внешней вентиляции
- Более точно отражает нарушение вентиляционно-перфузионных соотношений, чем абсолютное VD



Как определить V_d/V_t ?

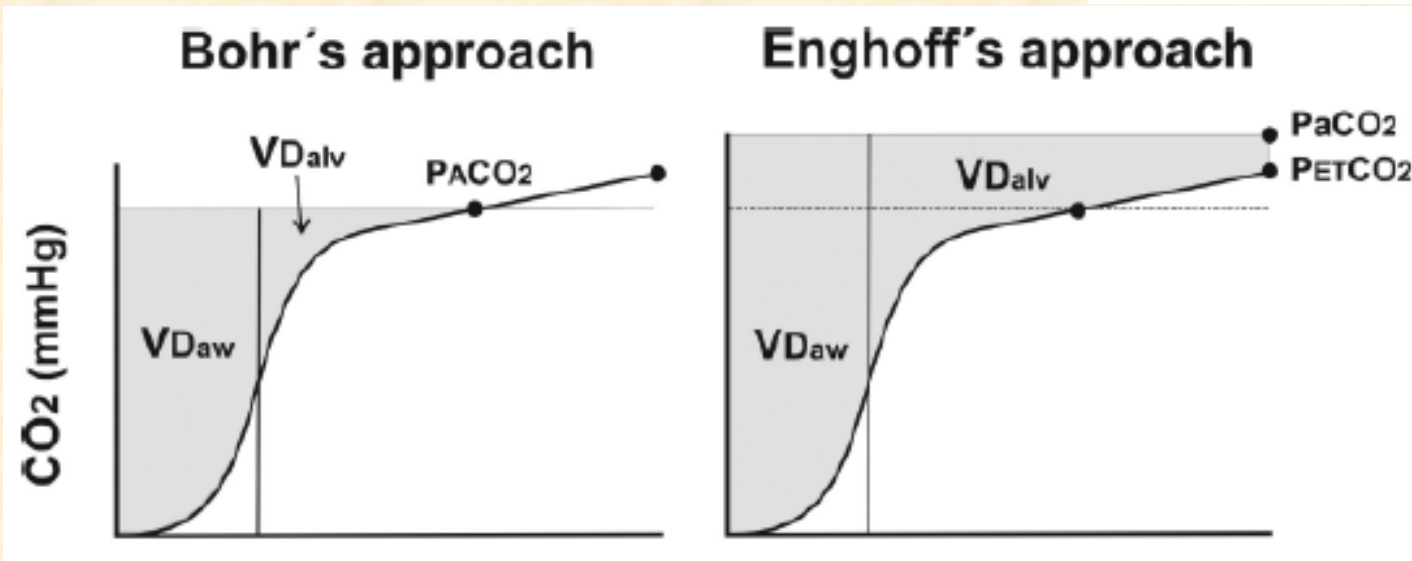
- P_{ACO_2} – альвеолярное CO_2
- P_{ECO_2} – «смешанное» CO_2 на выдохе

- Bohr

$$\frac{V_D}{V_T} = \frac{P_{ACO_2} - P_{ECO_2}}{P_{ACO_2}}$$

- Enghoff

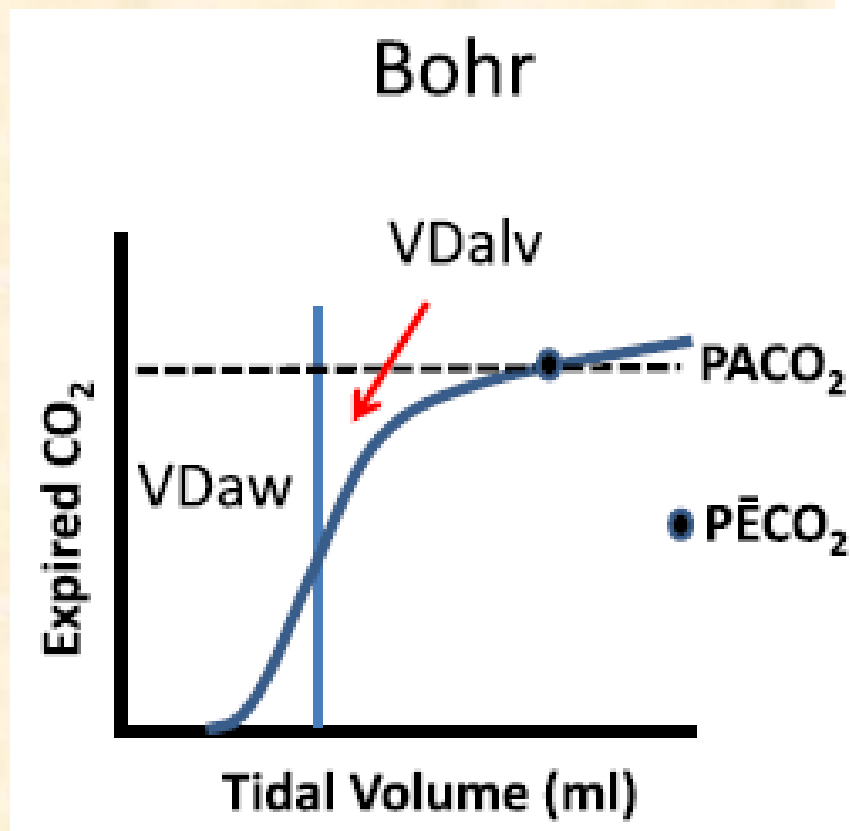
$$\frac{V_D}{V_T} = \frac{P_{aco_2} - P_{ECO_2}}{P_{aco_2}}$$



Волюметрическая капнография: Как определить Vd/Vt ?

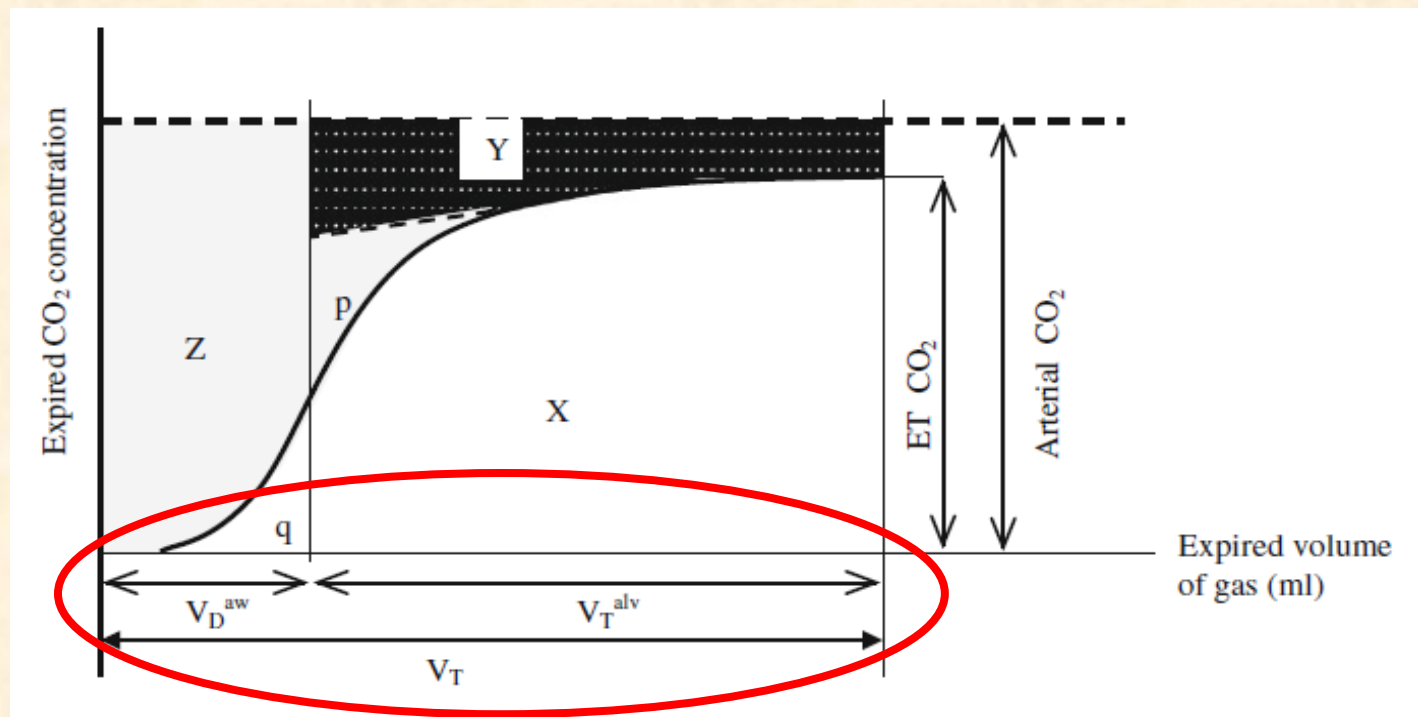
- P_{ACO_2} – альвеолярное CO_2
- P_{ECO_2} – «смешанное» CO_2 на выдохе
- Bohr

$$\frac{V_D}{V_T} = \frac{P_{ACO_2} - P_{ECO_2}}{P_{ACO_2}}$$



Волюметрическая капнография и V_d/V_t

R.Fletcher
(1981)



$$V_D/V_t \approx 1 - (V_e\text{CO}_2 / (V_t * F_e\text{CO}_2))$$

«...Измерение V_D/V_T методом волюметрической капнографии по точности
Близко к данным, полученным при помощи метаболического монитора...»

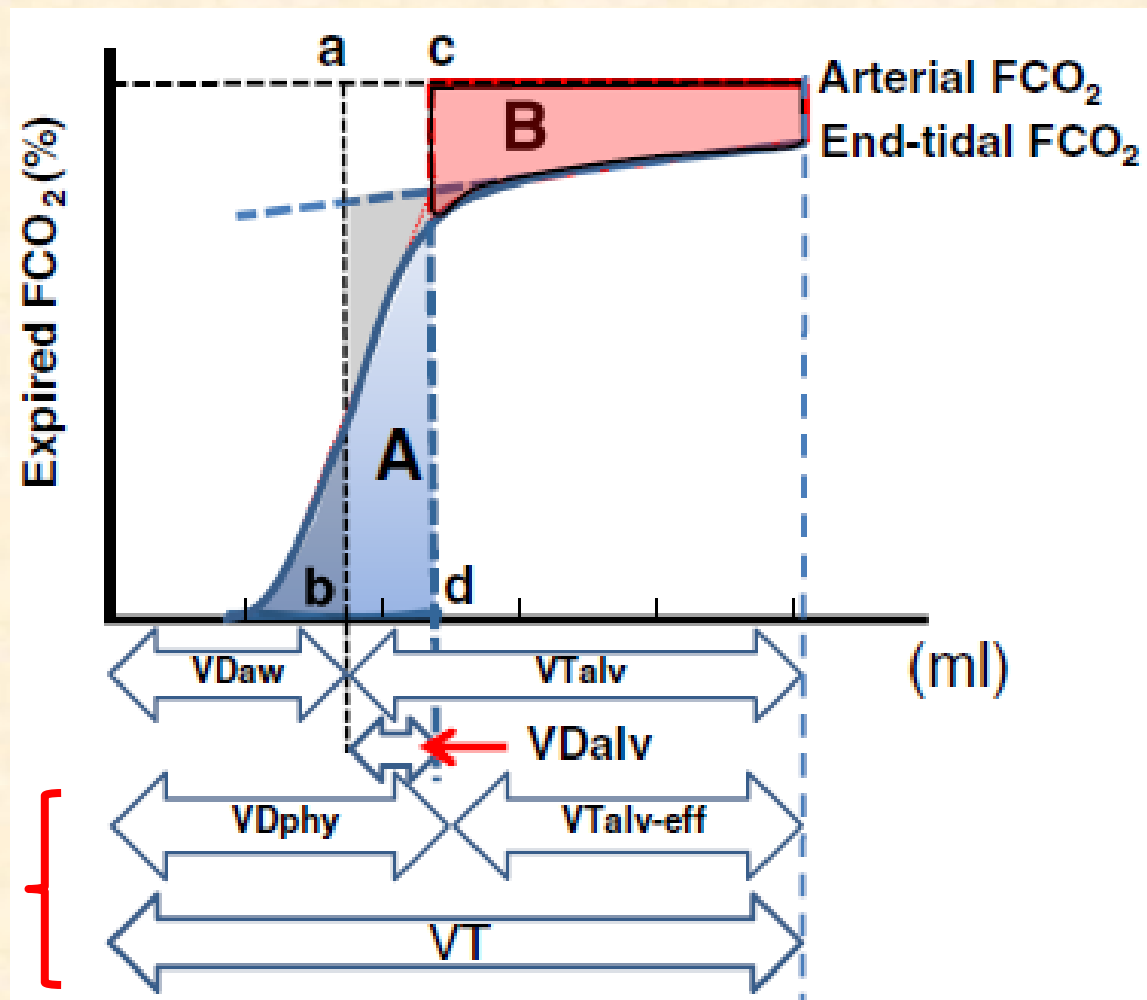
R.Kallet Respir Care 2005; 50: 462-7

M.Siobal et al. Respir Care 2013; 58: 1143

Волюметрическая капнограмма и V_{Dphys}/V_t

$V_{Dphys} \approx I + II$
фазы ($V_{Dana} + V_{Dalv}$)

V_{Dphys}/V_T



Y.Tang et al. Anesthesiology 2006; 104: 696

S.Verscheure et al. Crit Care 2016; 20: 184

Мониторинг V_d/V_t : значение

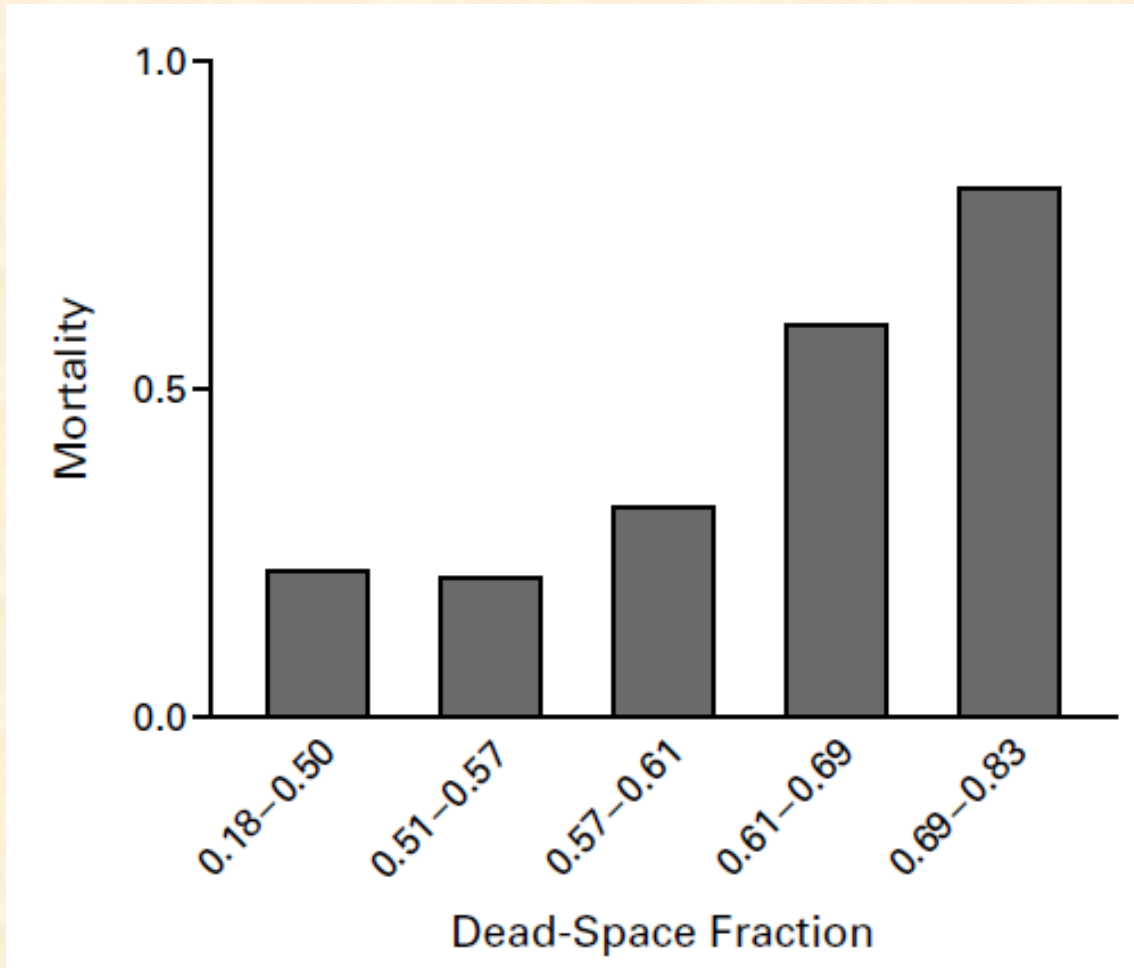
- V_d/V_t – косвенно отражает эффективность и патологию внешней вентиляции
- Рост V_d/V_t – паренхиматозная патология легких (пневмония, ОРДС)
- **V_d / V_t** – оценка тяжести нарушений вентиляционно-перфузионных соотношений при ОРДС
- Повышенное V_d/V_t коррелирует с тяжестью дыхательной недостаточности и риском летальности*

T.Nuckton NEJM 2002; 346: 1281-6

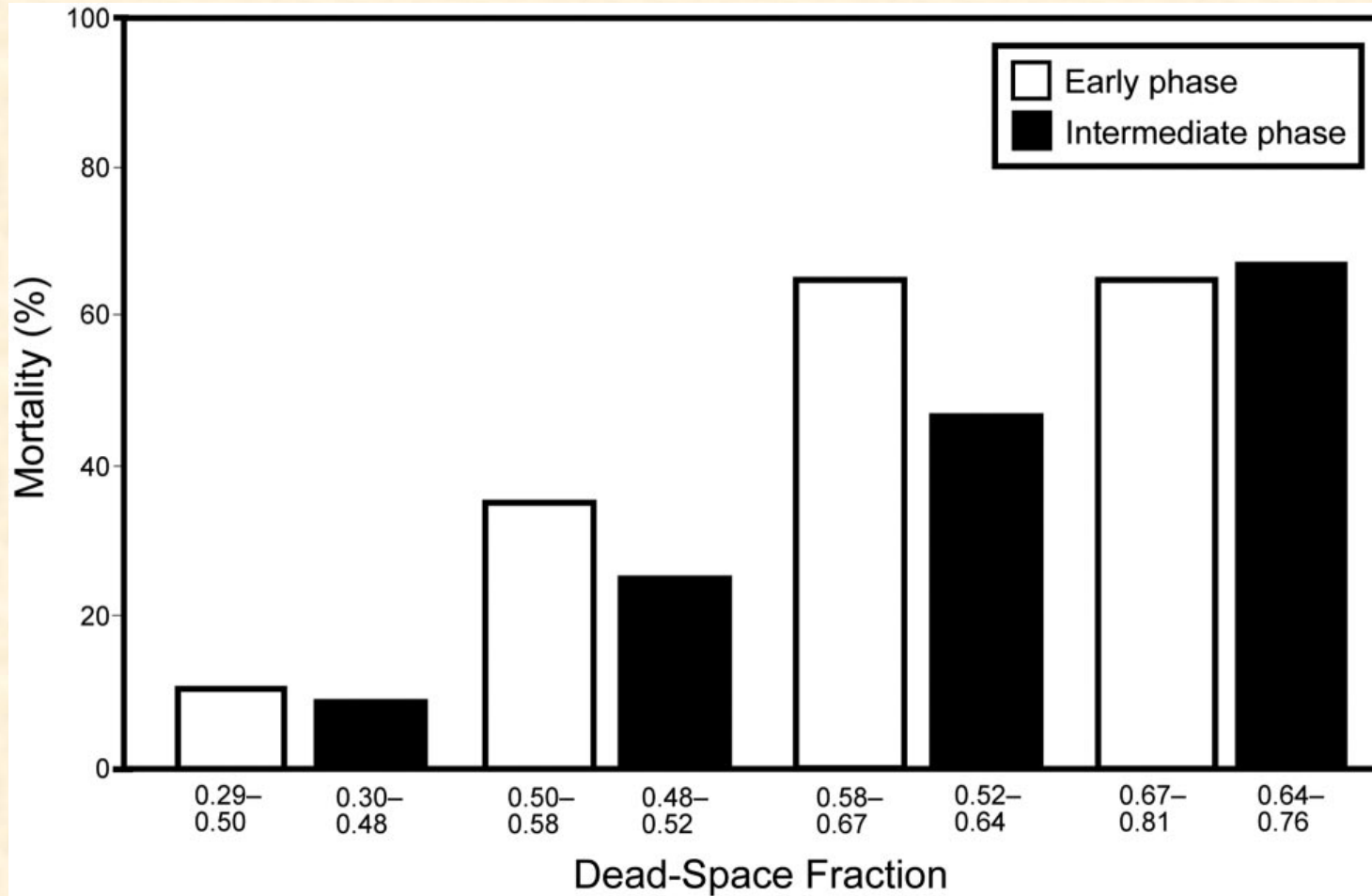
R.Kallet Respir Care 2004; 49: 1008-14

U.Lucangelo Chest 2008; 133: 62-71

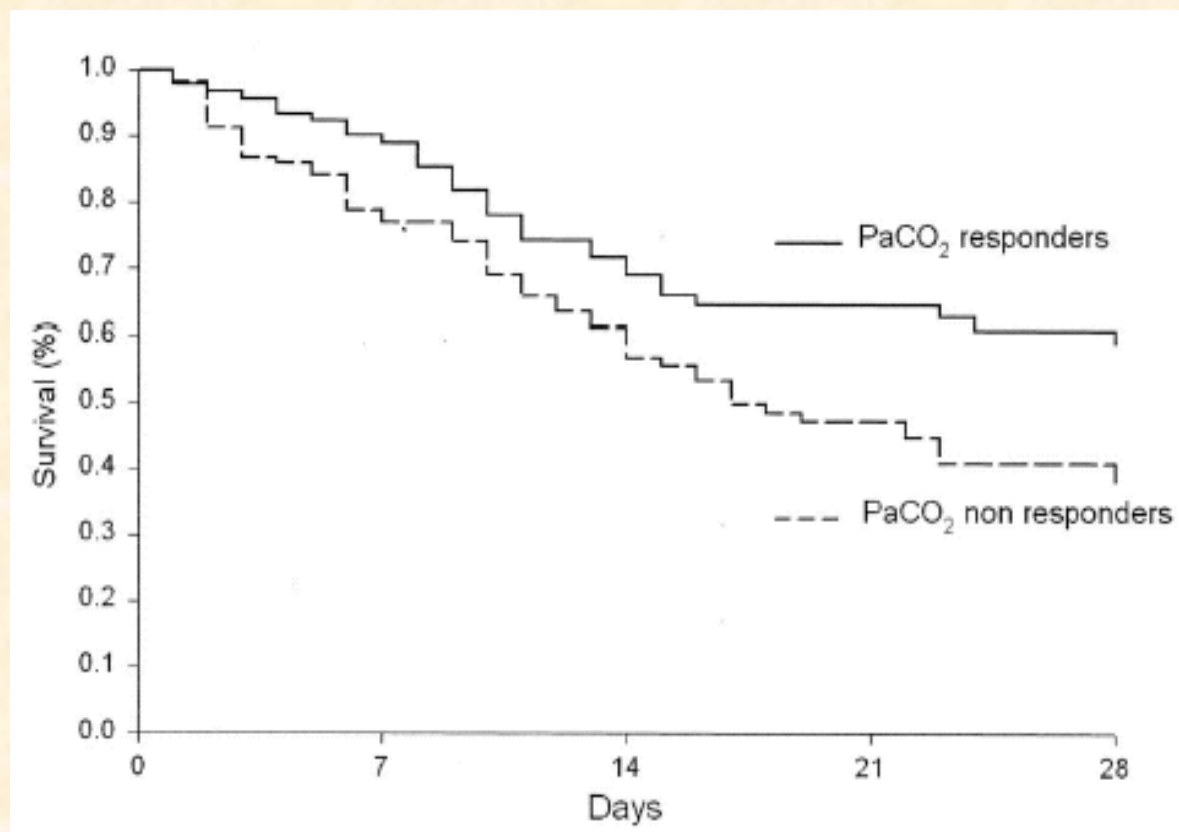
Vd/Vt и смертность при ОРДС



V_d/V_t и смертность при ОРДС



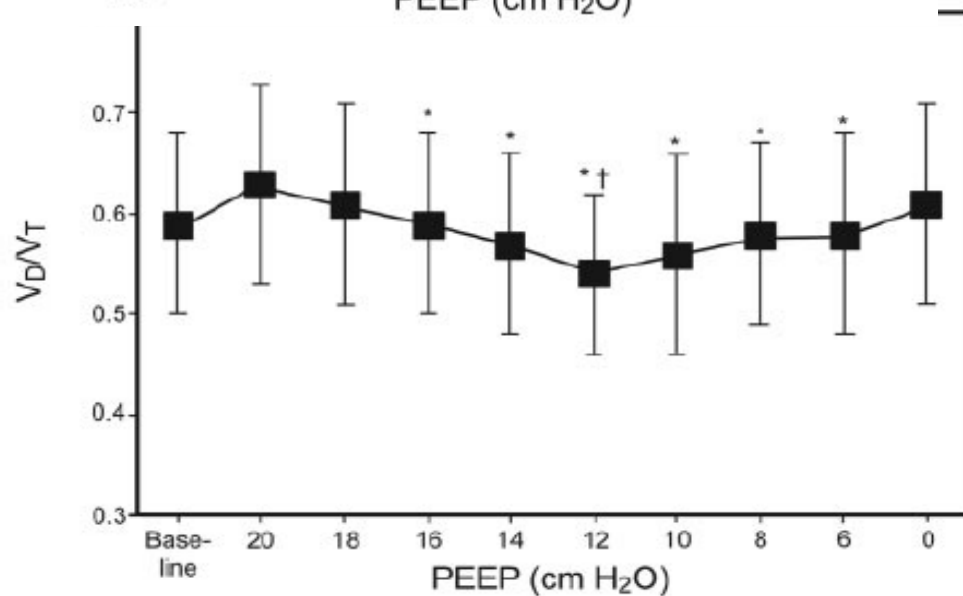
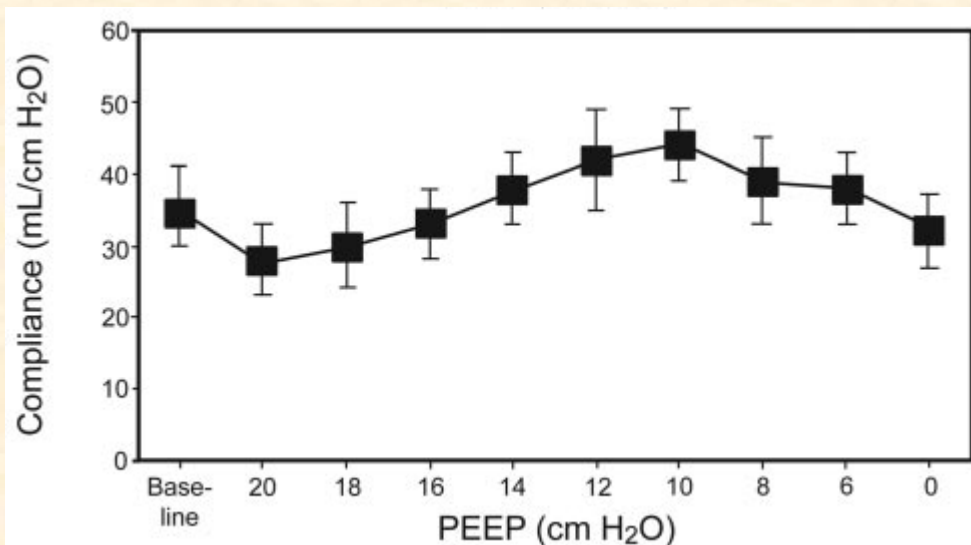
PaCO_2 (VD/VT) и прон-позиция у пациентов с ОРДС



«...при прон-позиции лучшая выживаемость оказалась у пациентов, которые «ответили» снижением PaCO_2 (вероятно, с уменьшением VD/VT)..»

Vd/Vt: рекрутмент и регулировка PEEP

- Снижение VD/VT – один из критериев эффективности рекрутмента
- Наименьший VD/VT – почти наибольший комплайнс...
- VD/VT - один из критериев установки PEEP....



G.Fengmei Respir Care 2012; 57: 1578

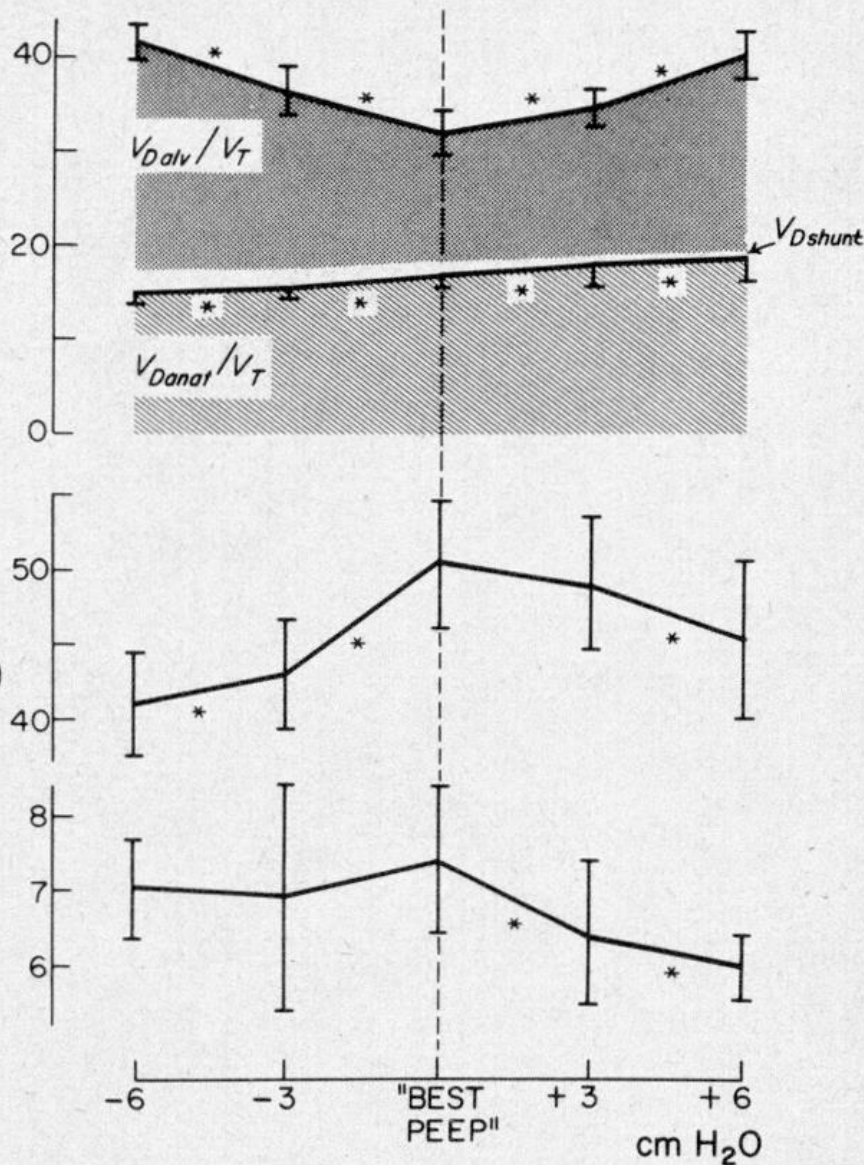
S.Maisch Anesth Analg 2008; 106: 175

VD/VT и PEEP

$$V_{D\text{phys}} / V_T$$

Total Compliance
(ml/cm H₂O)

Cardiac Output
(L / min)



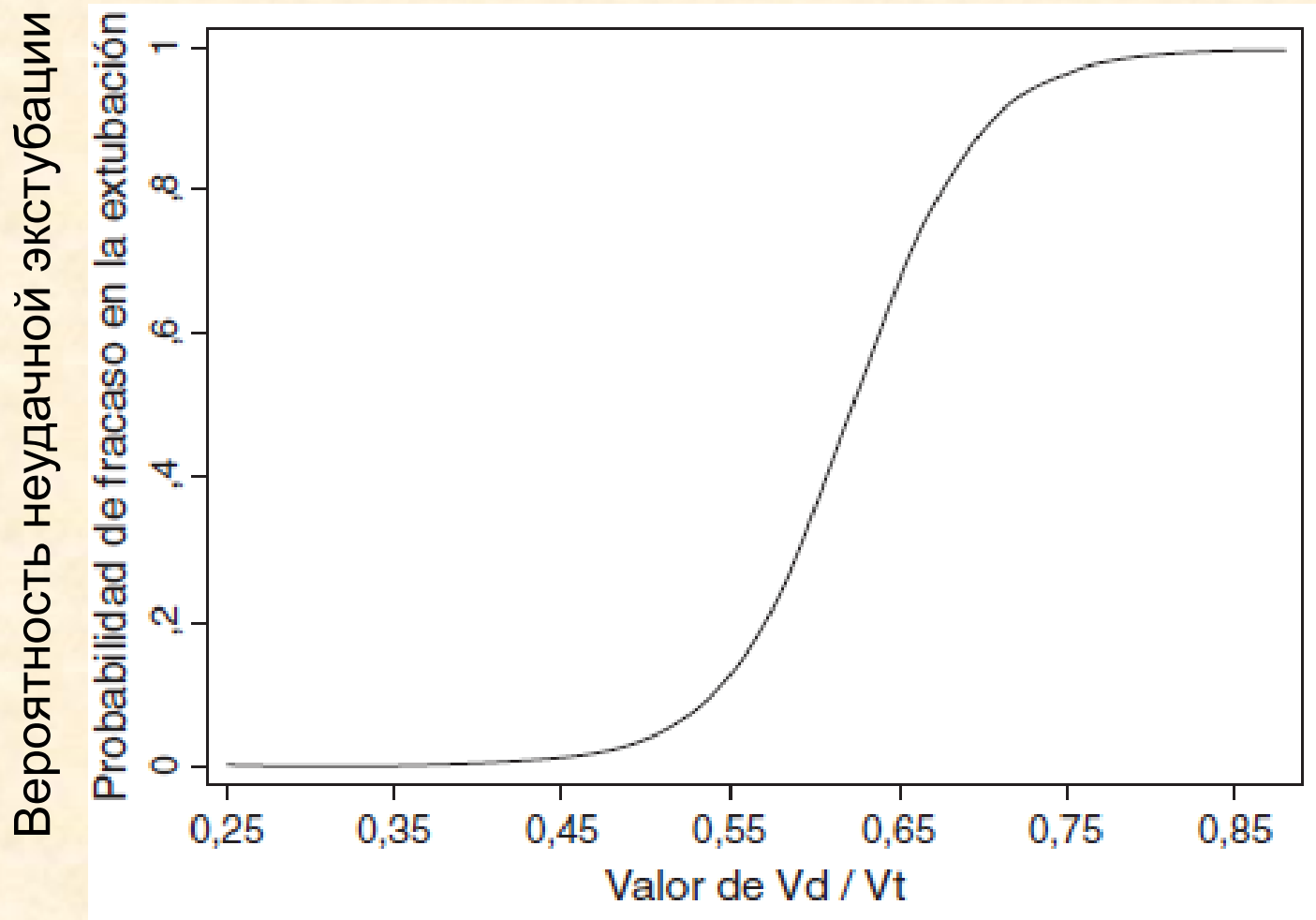
P.Suter NEJM 1975; 292: 284

Vd/Vt как прогностический критерий эффективности «отлучения» от ИВЛ

Table 4 Comparative univariate analysis of extubation success or failure according to the variables of the patients obtained prior to extubation.

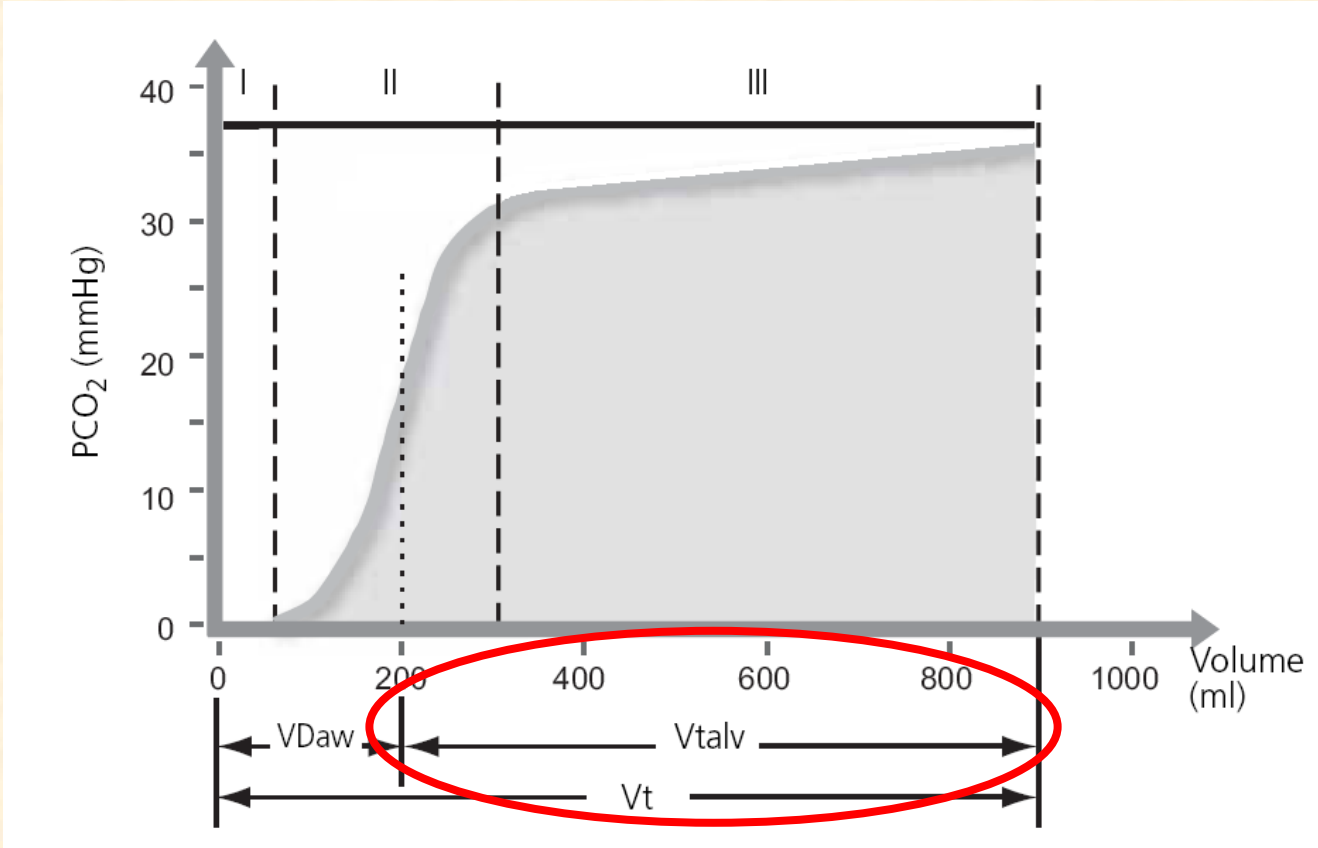
	Extubation success No. = 59 Mean (SD)	Extubation failure No. = 17 Mean (SD)	<i>p</i>
Heart rate, bpm	93.22 (18.06)	103 (27.80)	0.082
Respiratory frequency, rpm	20.96 (4.47)	25.11 (6.56)	0.003
Mv, l/min	9.80 (2.14)	11.10 (3.60)	0.064
Vte. l	0.55 (0.11)	0.55 (0.12)	0.952
P ASB	10.78 (3.87)	10.47 (3.28)	0.764
PaCO ₂	39.51 (6.14)	43.84 (5.29)	0.010
PaO ₂ /FiO ₂	293 (63.75)	242.27 (60.49)	0.004
PEEP	2.59 (1.17)	2.94 (1.5)	0.311
SBP, mmHg	137 (20.72)	139 (22.73)	0.732
DBP, mmHg	73.61 (12.40)	68.82 (14.46)	0.180
Vd/Vt	0.48 (0.09)	0.65 (0.08)	< 0.0001

Vd/Vt и вероятность неудачной экстубации



Мертвое пространство V_{Daw} и альвеолярная вентиляция V'_{alv}

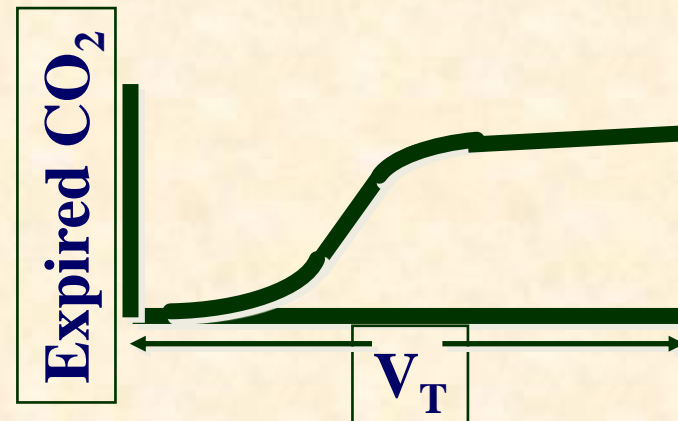
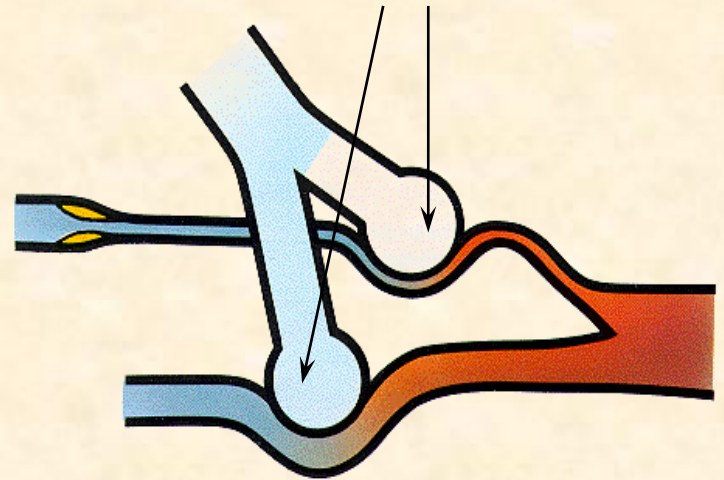
Определение альвеолярной вентиляции (V'_{alv}) позволяет оценить уровень вентиляции, участвующей в газообмене



MV_{alv} (V'_{alv})

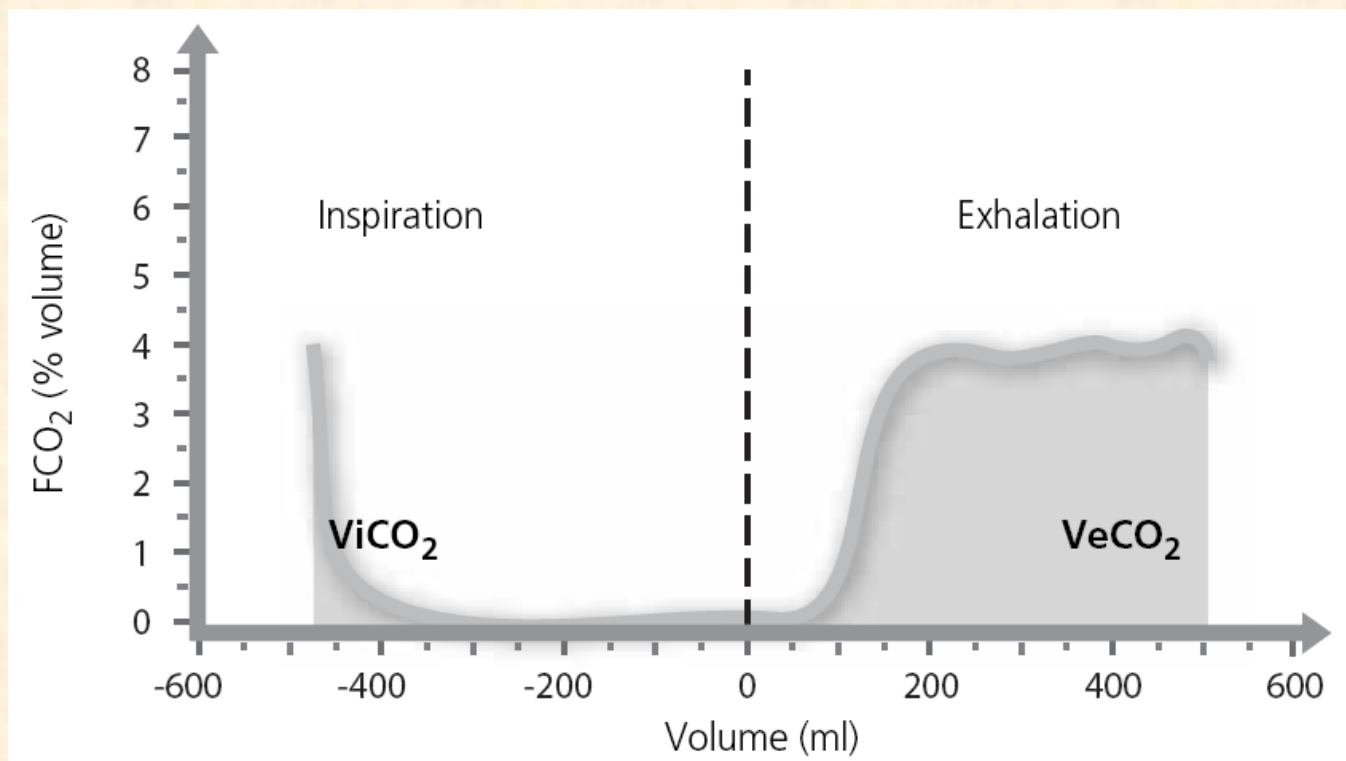
- Минутная альвеолярная вентиляция
- Минутный объем дыхания, участвующий в газообмене
- $N \approx \geq 50-60$ ml/kg/min

Альвеолярная вентиляция



VCO₂: минутная продукция CO₂

VCO₂ позволяет оценить уровень метаболизма (↑ при сепсисе, гипертермии...), вентиляции (↓ при росте VD/VT), перфузии (↓ при эмболии, гипотензии...) и эффективность лечения



$$VCO_2 = (VeCO_2 - ViCO_2) * RR$$

$$VCO_2 = VTCO_2 * RR$$

$VCO_2 / VeCO_2$: факторы влияния

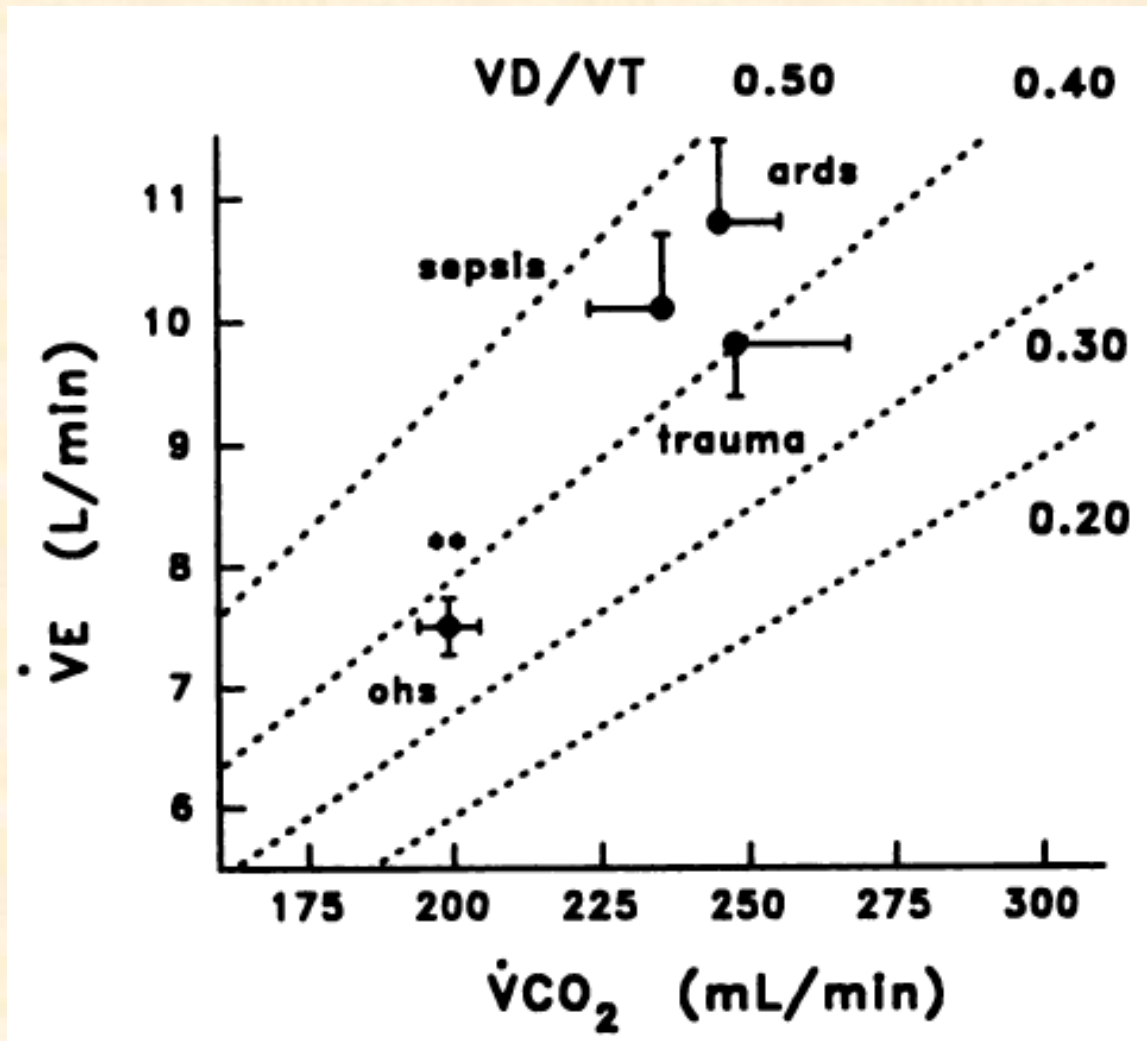
Рост VCO_2 : (> 3 ml/kg/min, $\approx > 200$ мл/мин)

- Повышенная продукция CO_2 вследствие ССВО (сепсис)
- Гипертермия
- Мышечная дрожь, судороги
- Реперфузионный синдром
- Ожоговая б-нь
- Инфузия бикарбоната
- Гипералиментация

Снижение VCO_2 :

- Седация (анестезия)
- Гипотермия
- Гемодинамическая проблема, снижение перфузии и микроциркуляции
- ТЭЛА
- Бронхоспазм
- Снижение реального ДО (при той же ЧД)

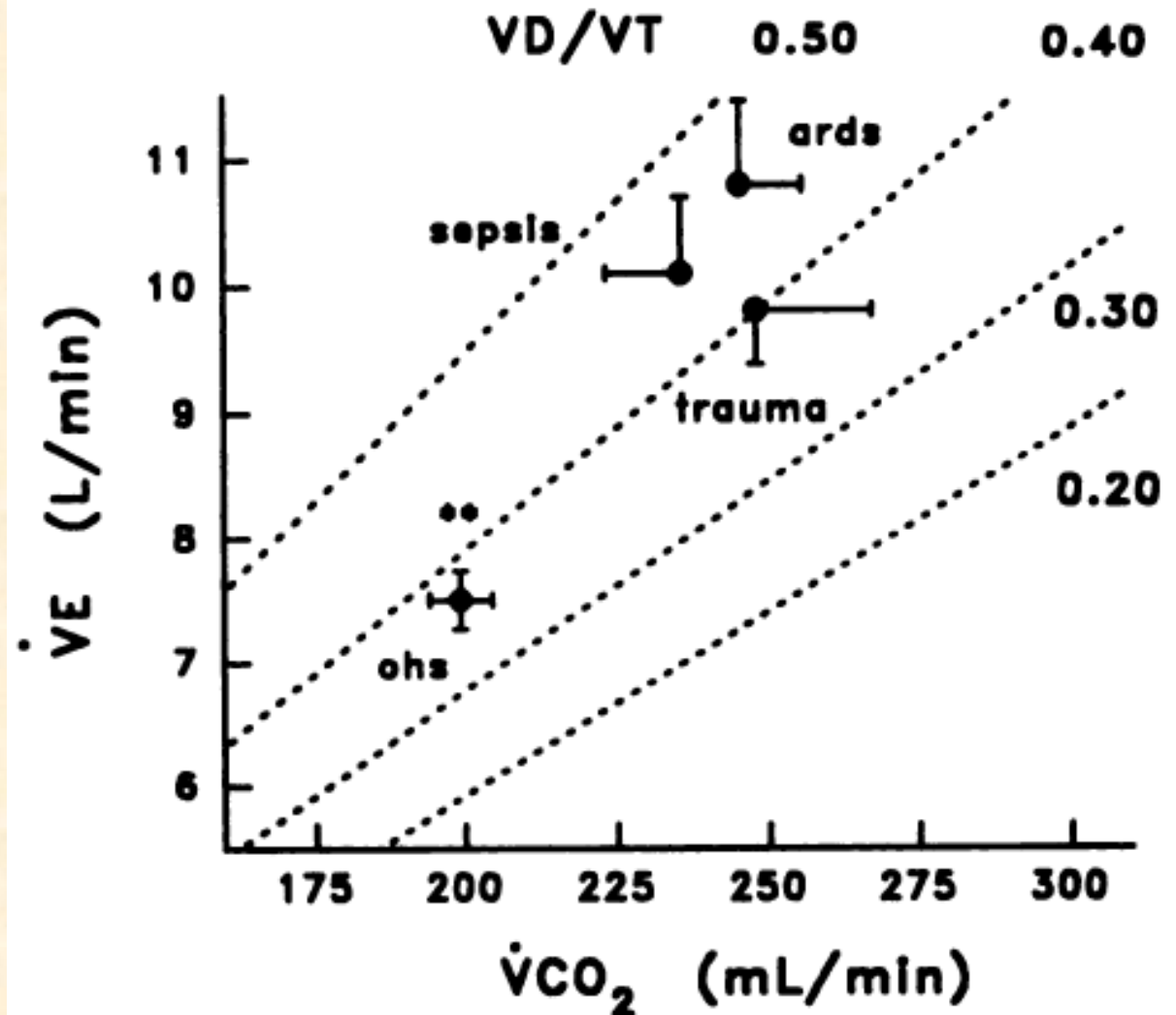
$\dot{V}CO_2$ и необходимый минутный объем вентиляции



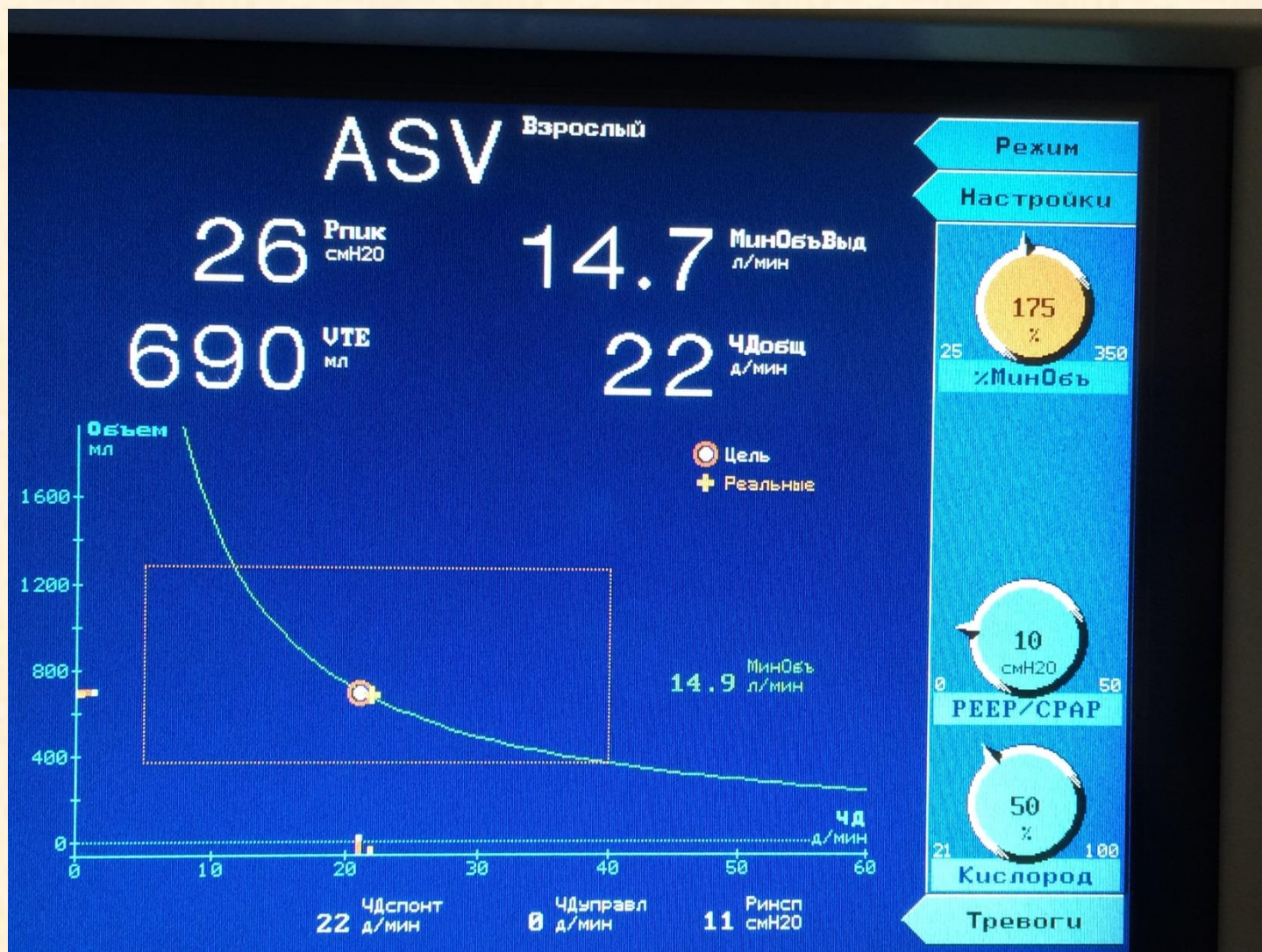
Hypermetabolism and efficiency of CO₂ removal in acute respiratory failure

R Kiiski and J Takala

Chest 1994;105;1198-1203

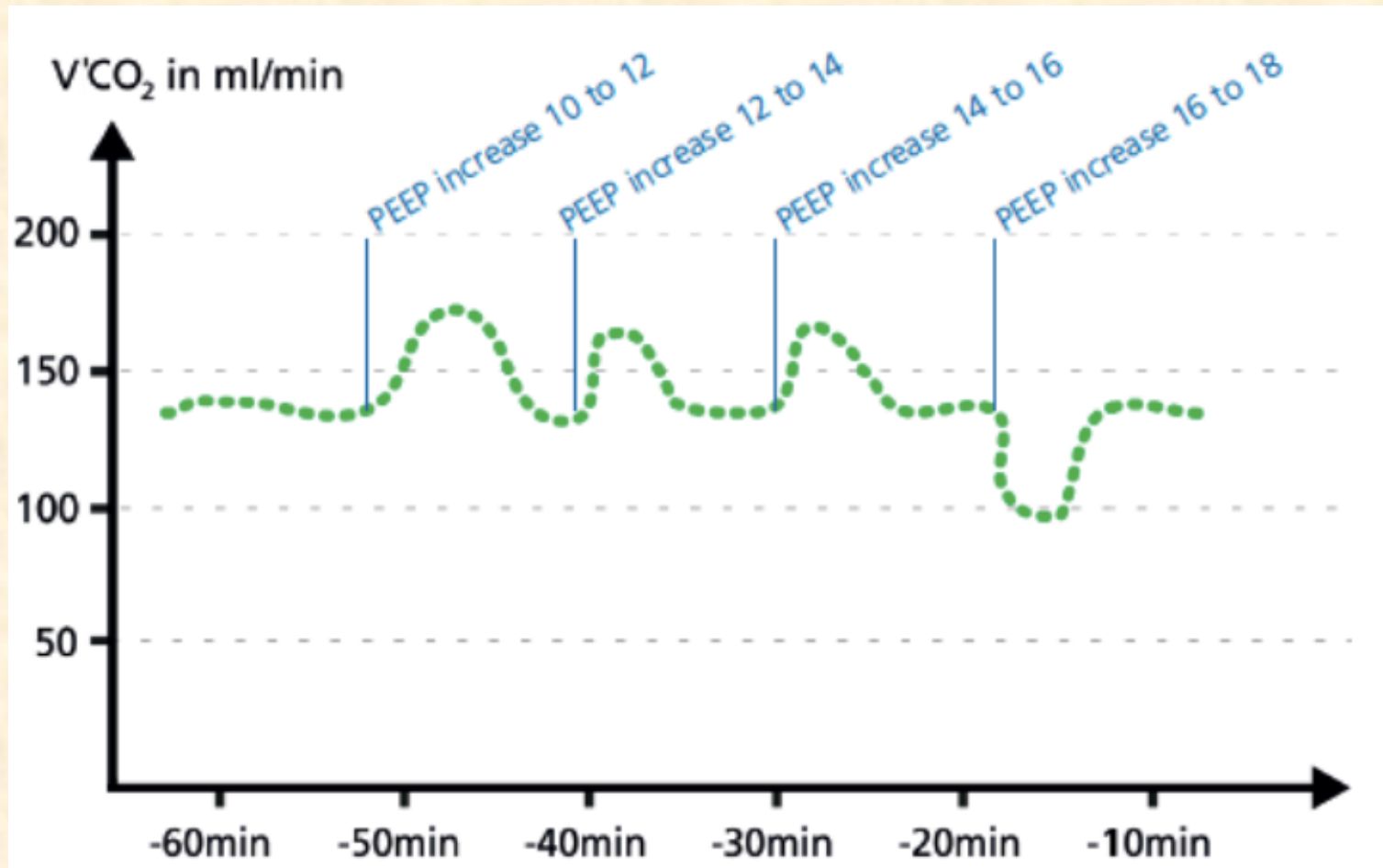


%MinVol и ССВО

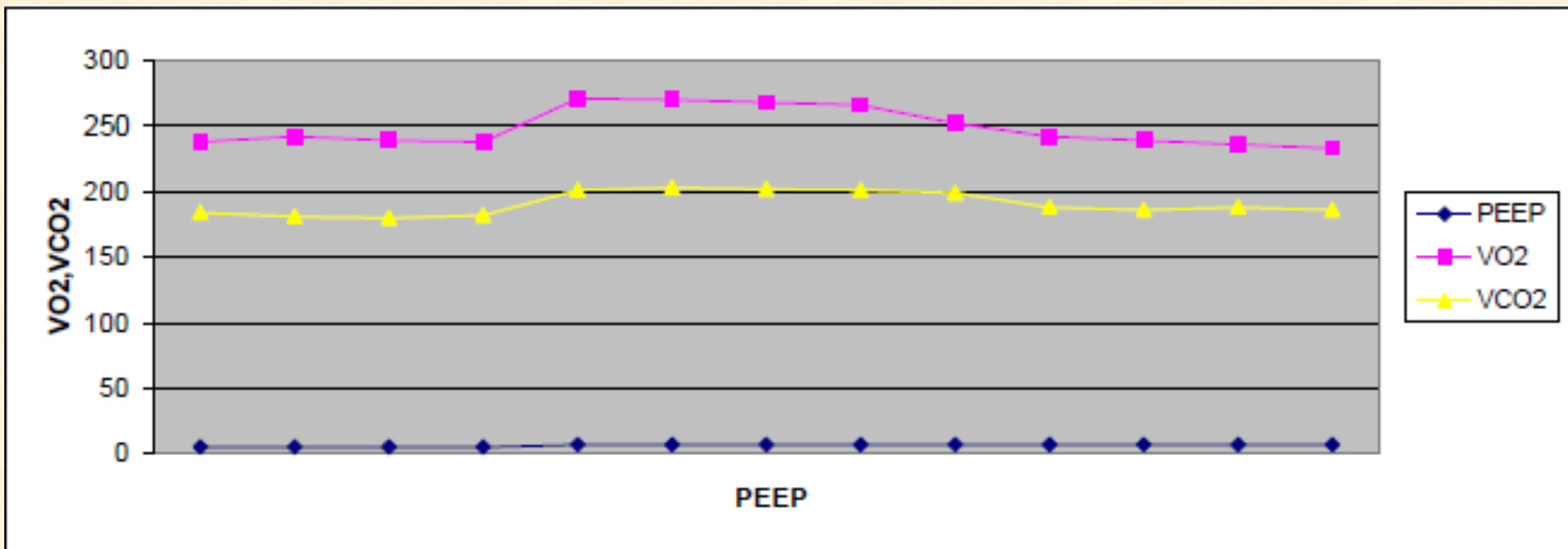


- MinVol 175%
- ЧД 22/мин
- SpO2 95%

VCO₂ и PEEP



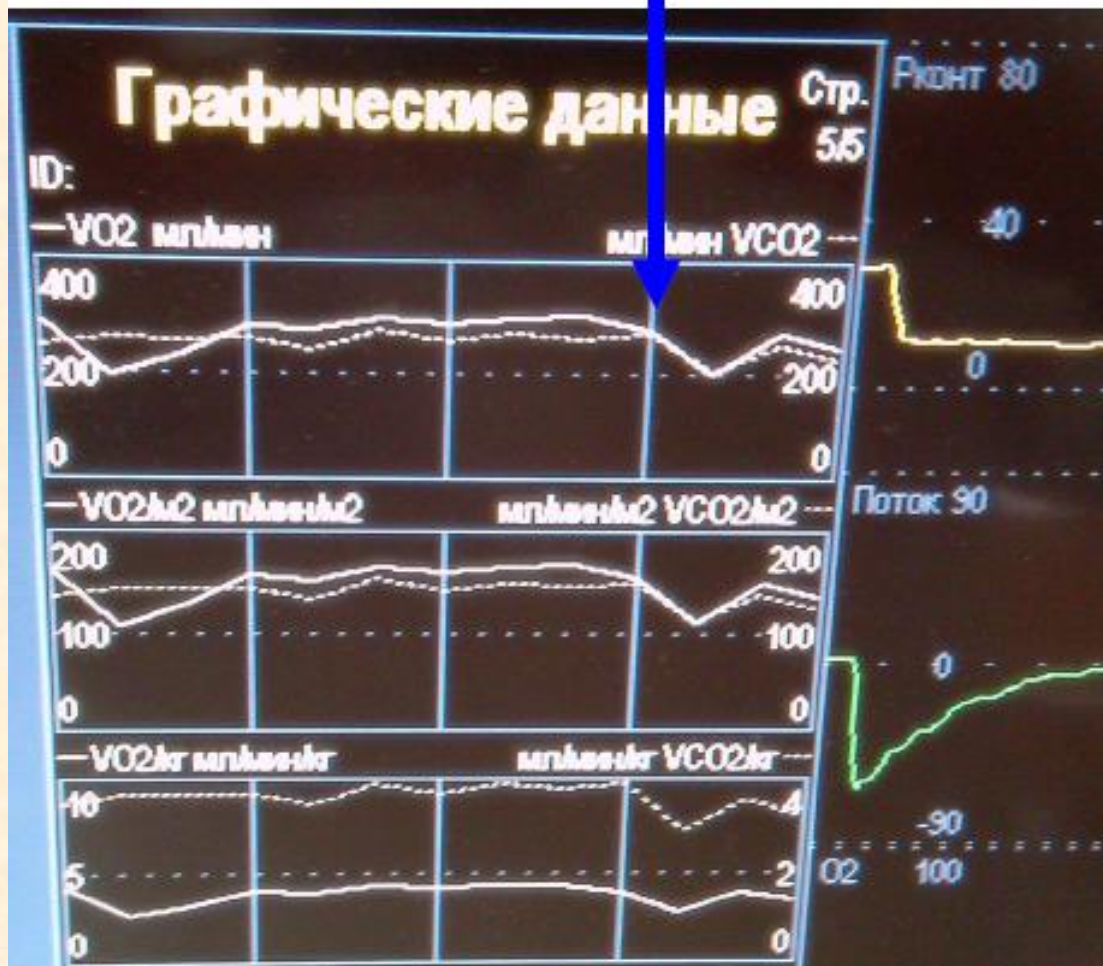
VO₂, VCO₂ и PEEP



Из презентации К.М.Лебединского, 2014

VO_2 , VCO_2 и PEEP

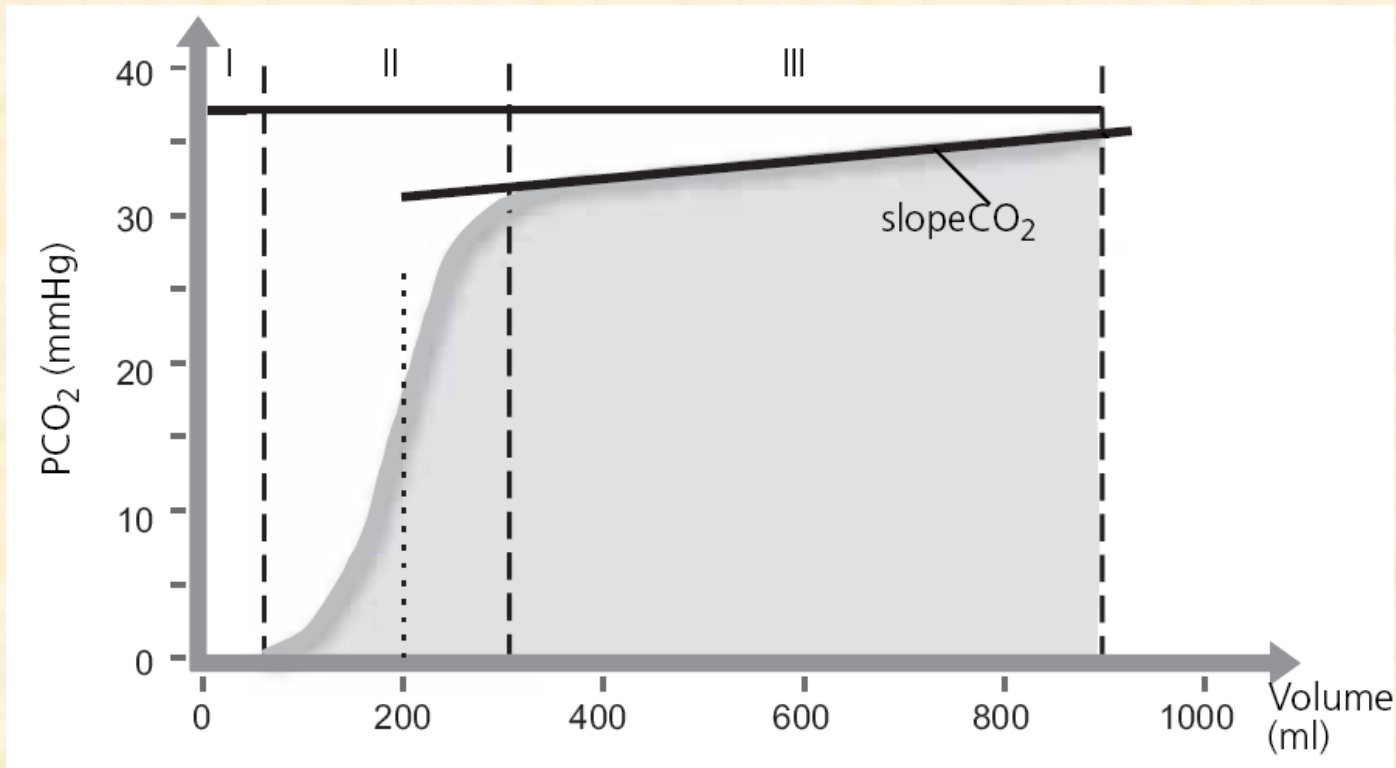
PEEP 8→11



Из презентации К.М.Лебединского, 2014

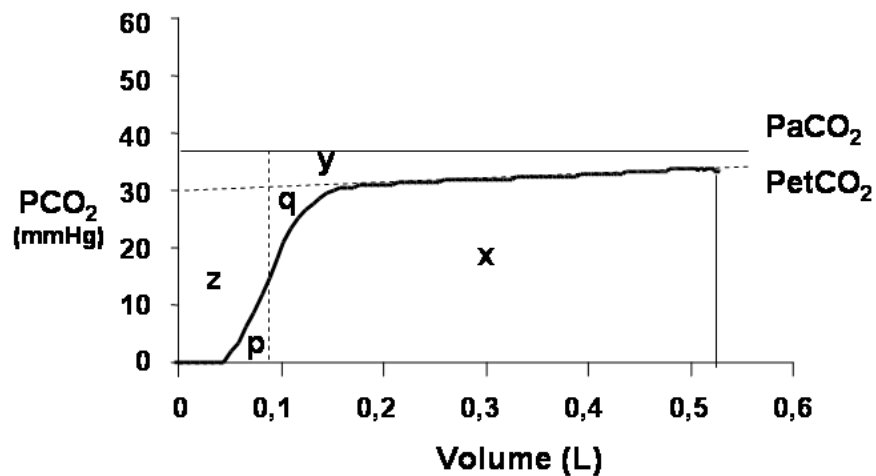
Наклон плато кривой CO_2 -объем (slope CO_2)

Форма наклона кривой (slope CO_2) позволяет оценить степень эффективности вентиляции и обструктивной патологии (ХОБЛ, астма и т.д.)

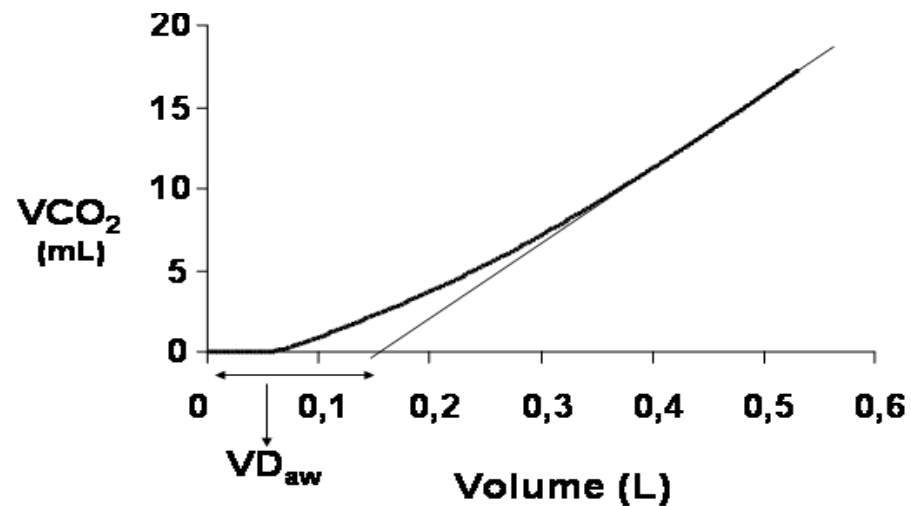
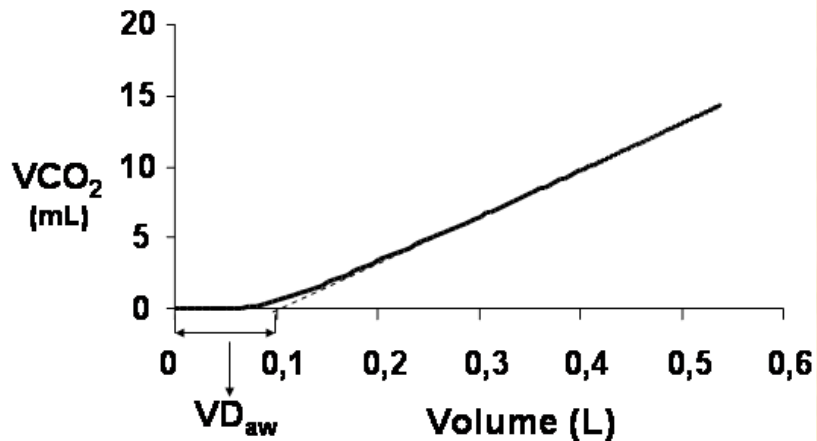
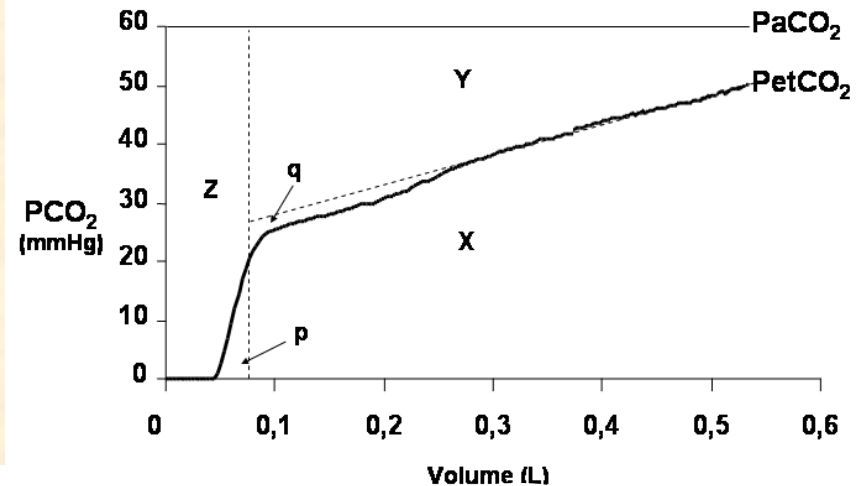


Форма (наклон) волюметрической капнограммы

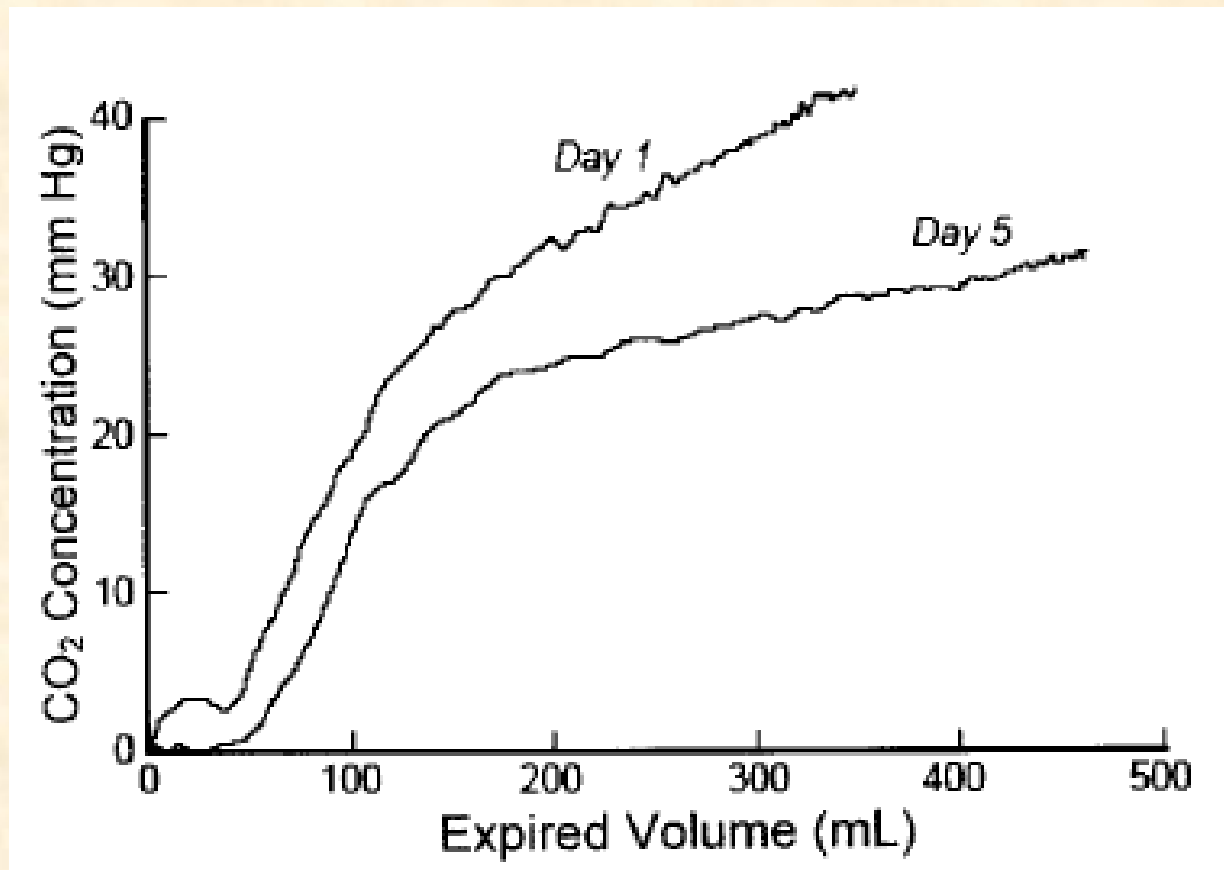
Без патологии



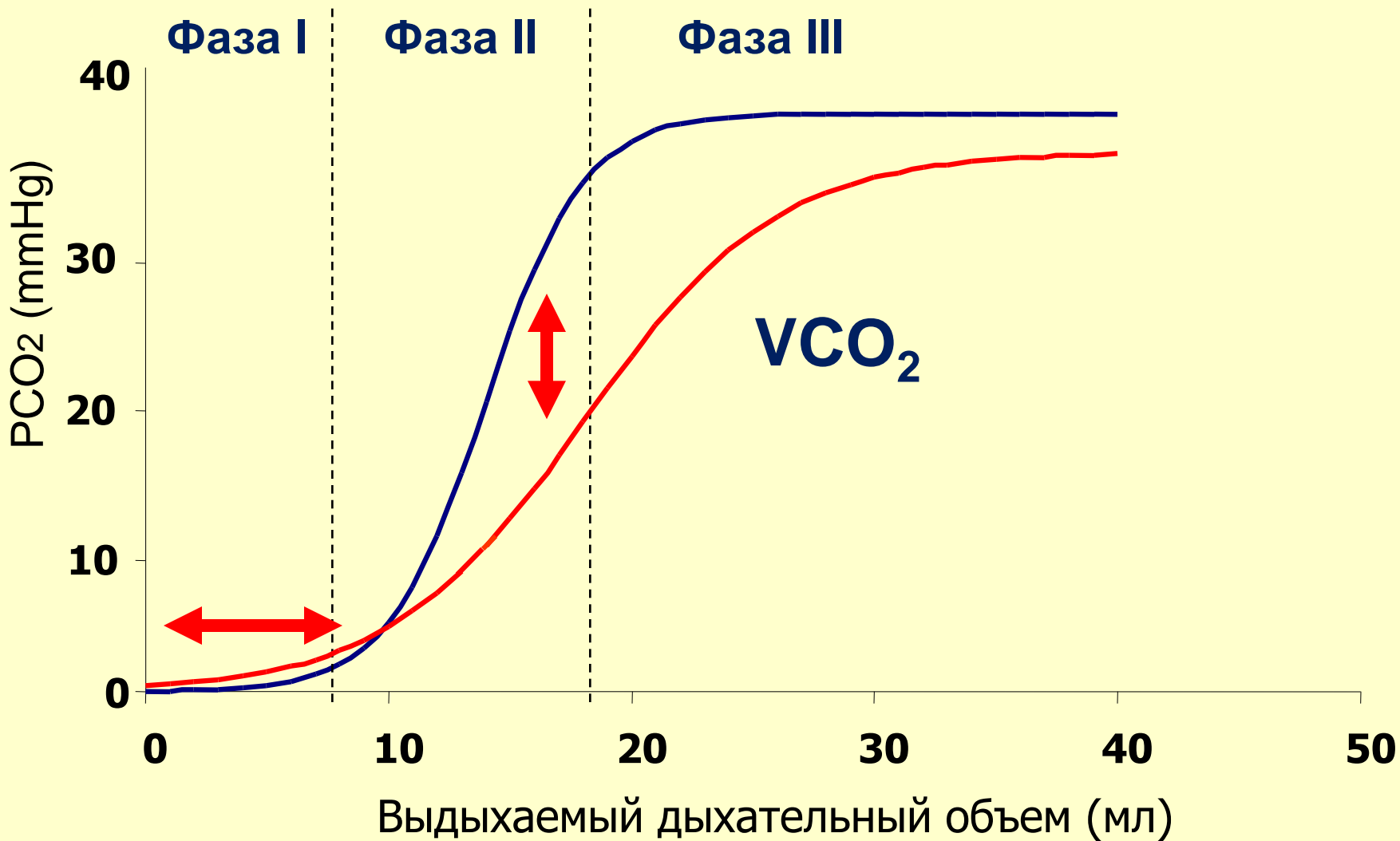
ХОБЛ



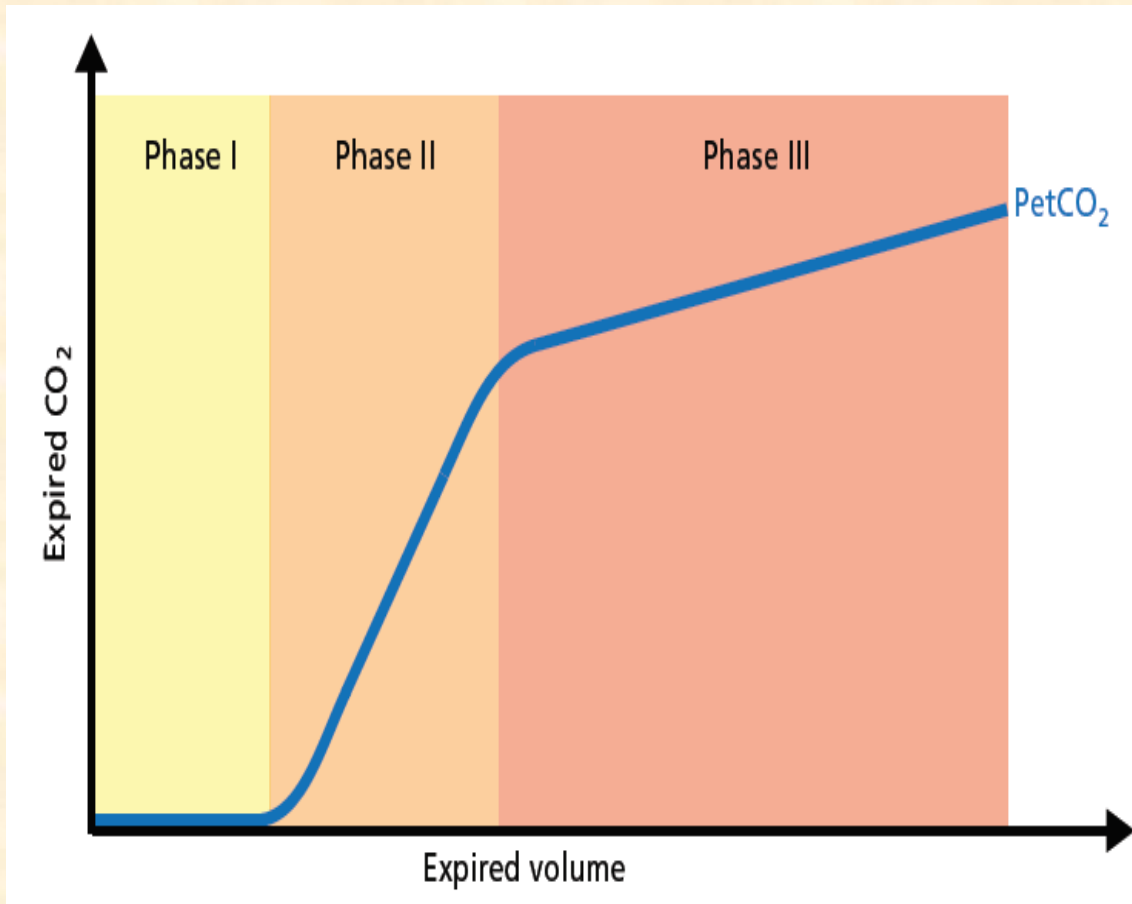
Динамика наклона кривой CO₂-объем и обструктивная патология легких



Фаза 1 : V_{Dana} Фаза 2 : перфузия Фаза 3: V/Q

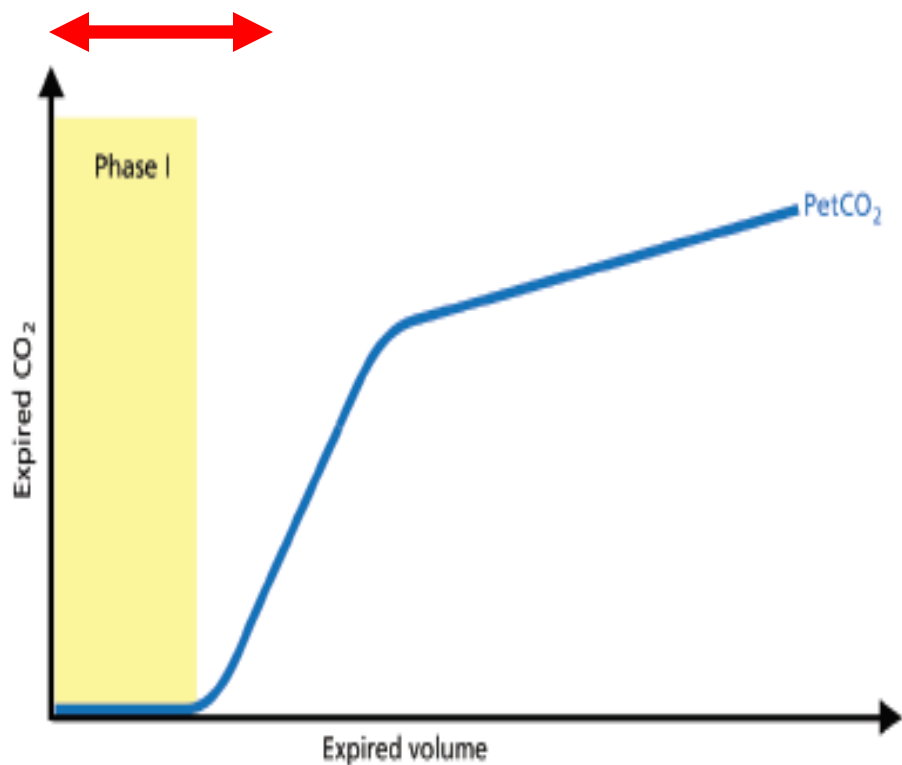


Изменения фаз воллюметрической капнографии



Фаза I – Анатомическое мертвое пространство

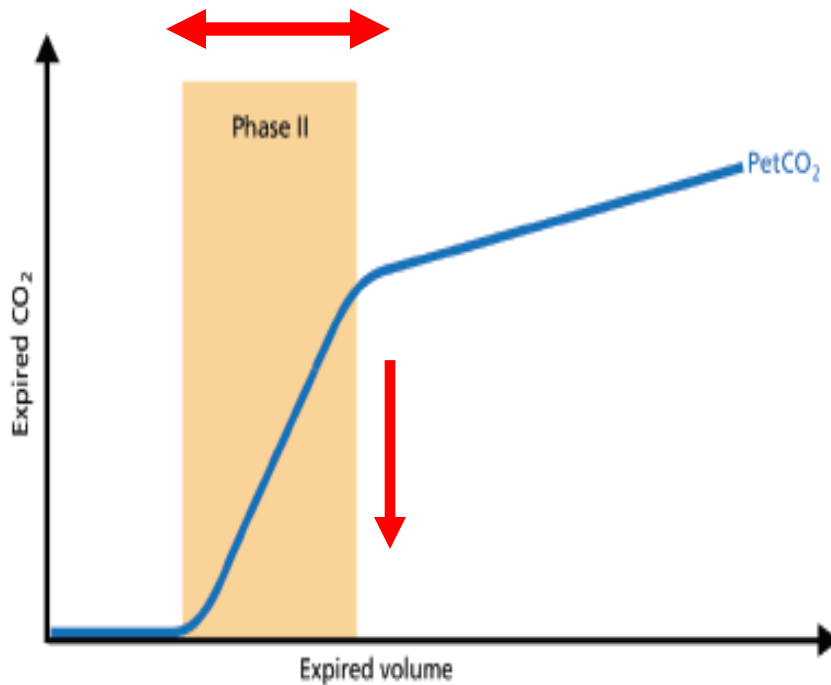
Расширение фазы I – увеличение анатомического и/или «инструментального» мертвого пространства



A prolonged Phase I indicates an increase in anatomical dead space ventilation (VD_{aw}).

Presence of CO₂ during Phase I indicates rebreathing or that the sensor needs to be recalibrated.

Фаза II – Транзиторная



A prolonged Phase II can indicate an increase in airway resistance and/or a Ventilation/Perfusion (V/P) mismatch.

Расширение и/или снижение фазы II – увеличение сопротивления дыхательных путей и/или нарушение в-п соотношений

Фаза 2 ↓ : Перфузия ↓

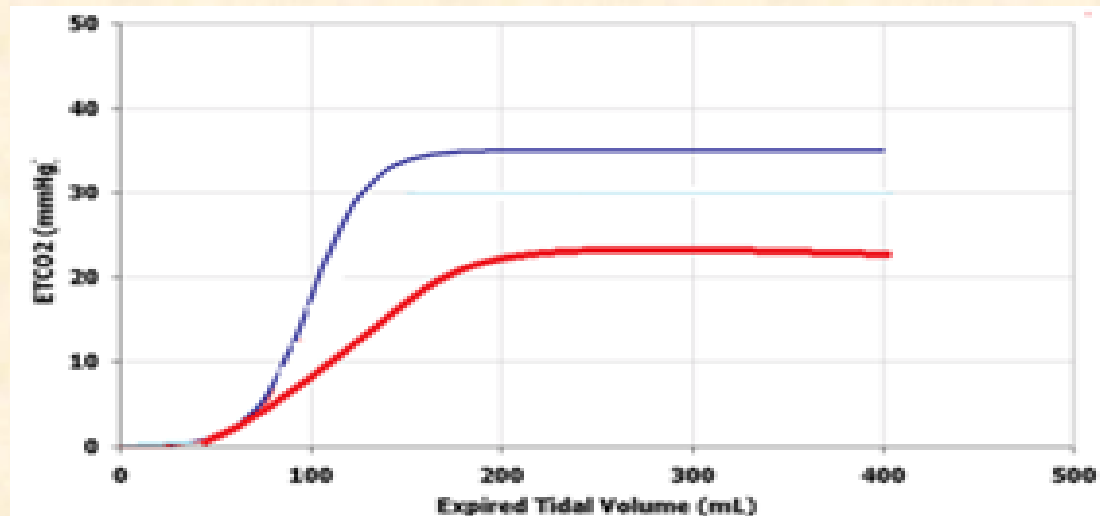
- ↓ Венозный возврат

- ◆ Гиповолемия?

- ◆ Сердечная недостаточность?

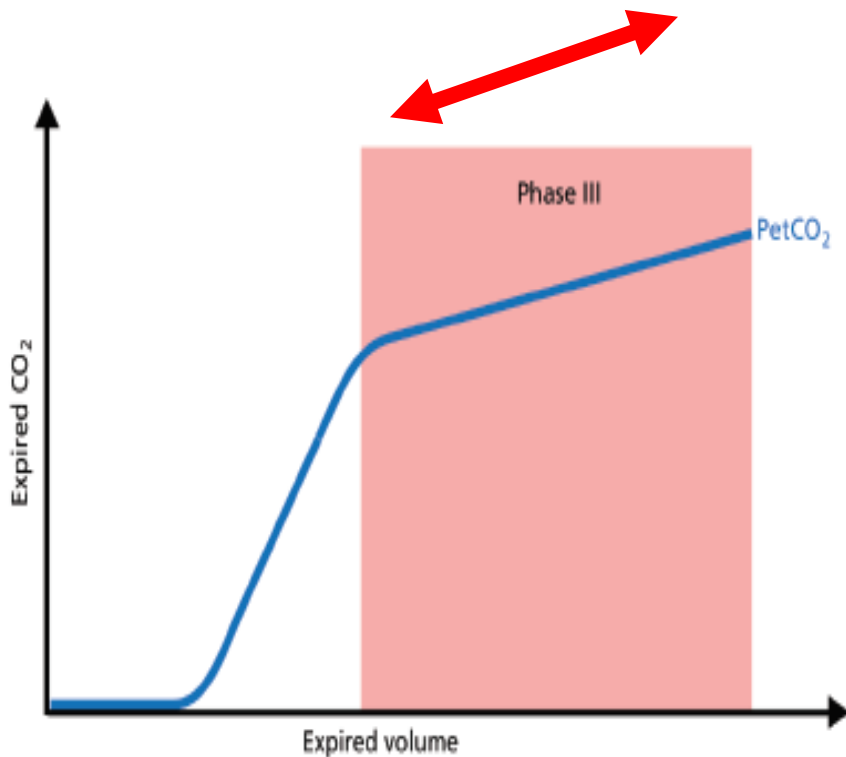
- ◆ Высокое внутригрудное давление?

- ◆ Чрезмерное РЕЕР?



Фаза III – «Альвеолярная»

Увеличение наклона кривой плато –
неравномерность выдоха, увеличение сопротивления дыхательных путей



A steep slope in Phase III provides information about lung heterogeneity with some fast and some slow emptying lung areas.

For example, obstructed airway results in insufficiently ventilated alveoli, inducing high CO₂ values and increased time constants in this region.

Увеличение фазы 3

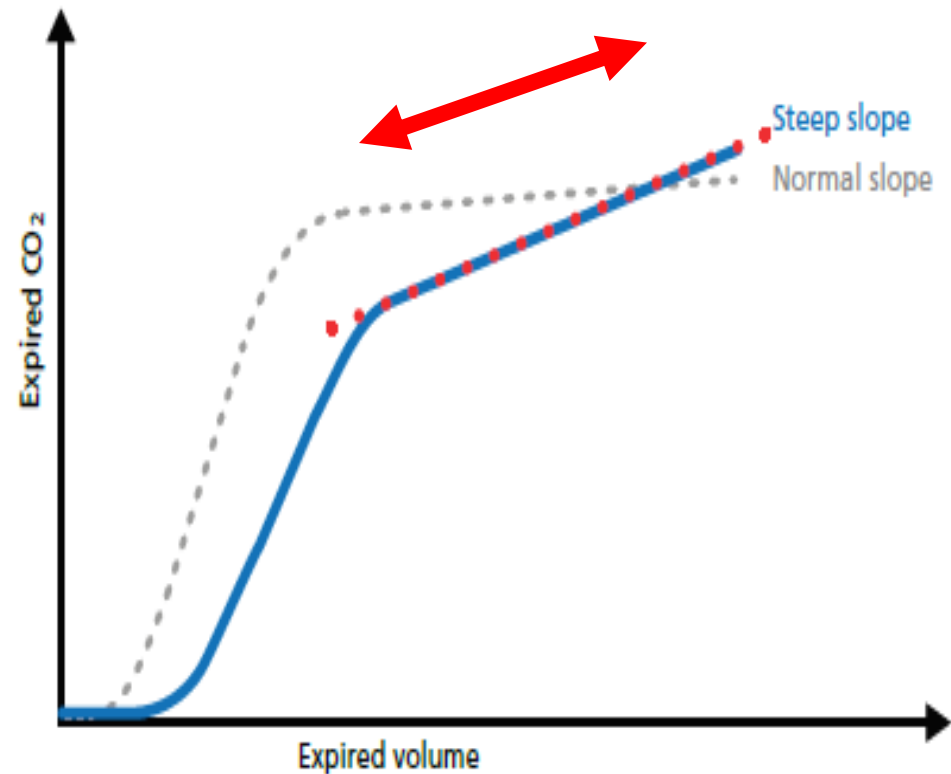
- Фаза 3 – распределение газа
 - ◆ Нарушение V/Q ?
 - ◆ Избыточное PEEP ?
 - ◆ ↑ Сопротивление дыхательных путей ?

Фаза III : наклон кривой



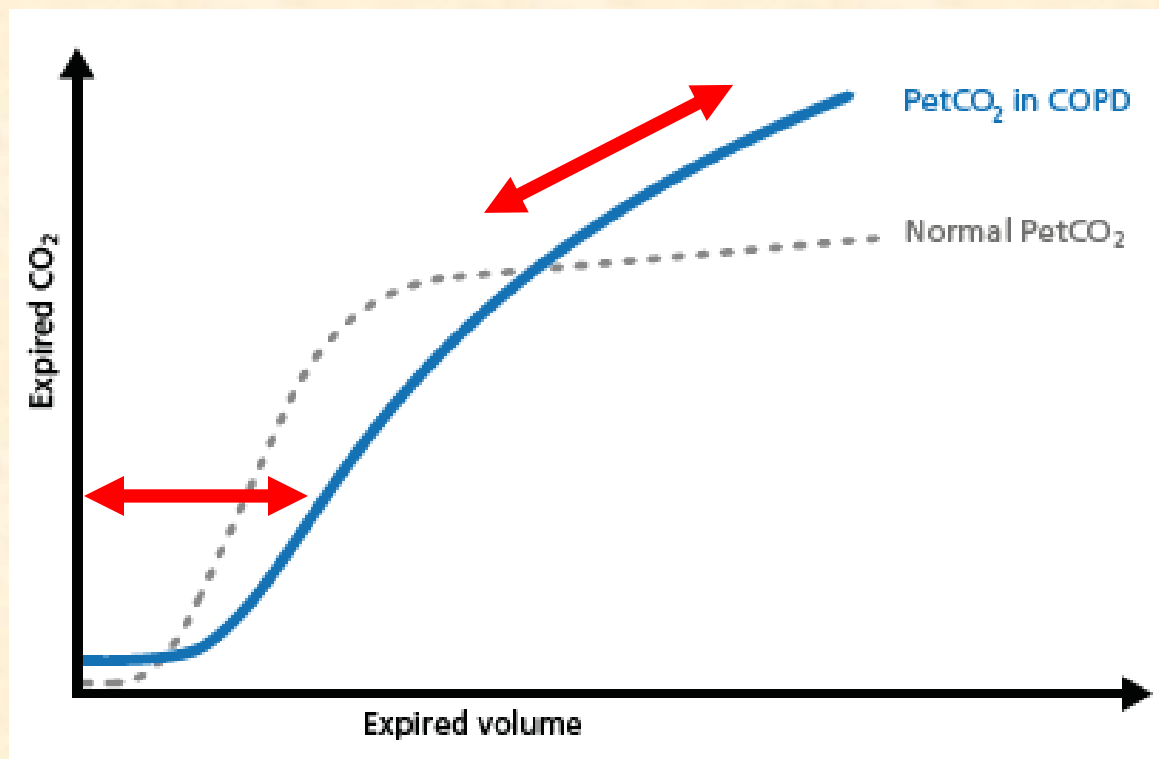
A steep slope can be seen, for example, in COPD and ARDS patients.

Более «крутой»
наклон кривой,
характерен для
ХОБЛ, реже - ОРДС



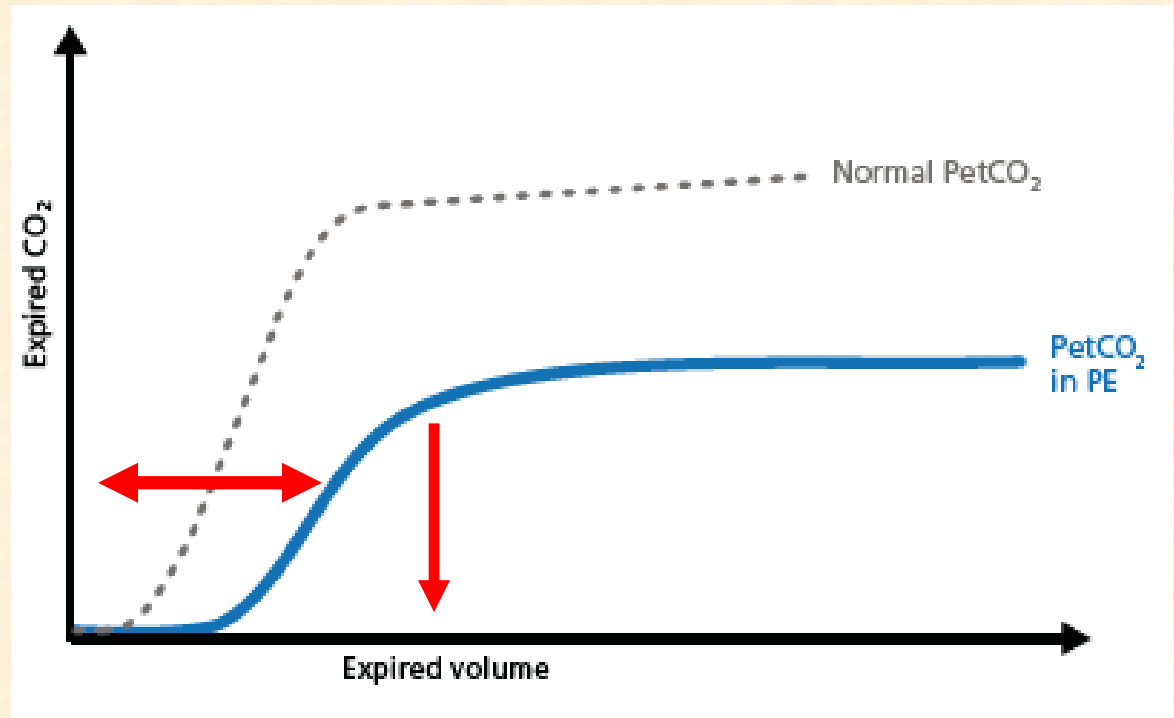
Волюметрическая капнограмма при ХОБЛ

Увеличение фазы I,
расширение фазы II,
значительное
увеличение наклона
кривой 3-й фазы,
плато практически нет



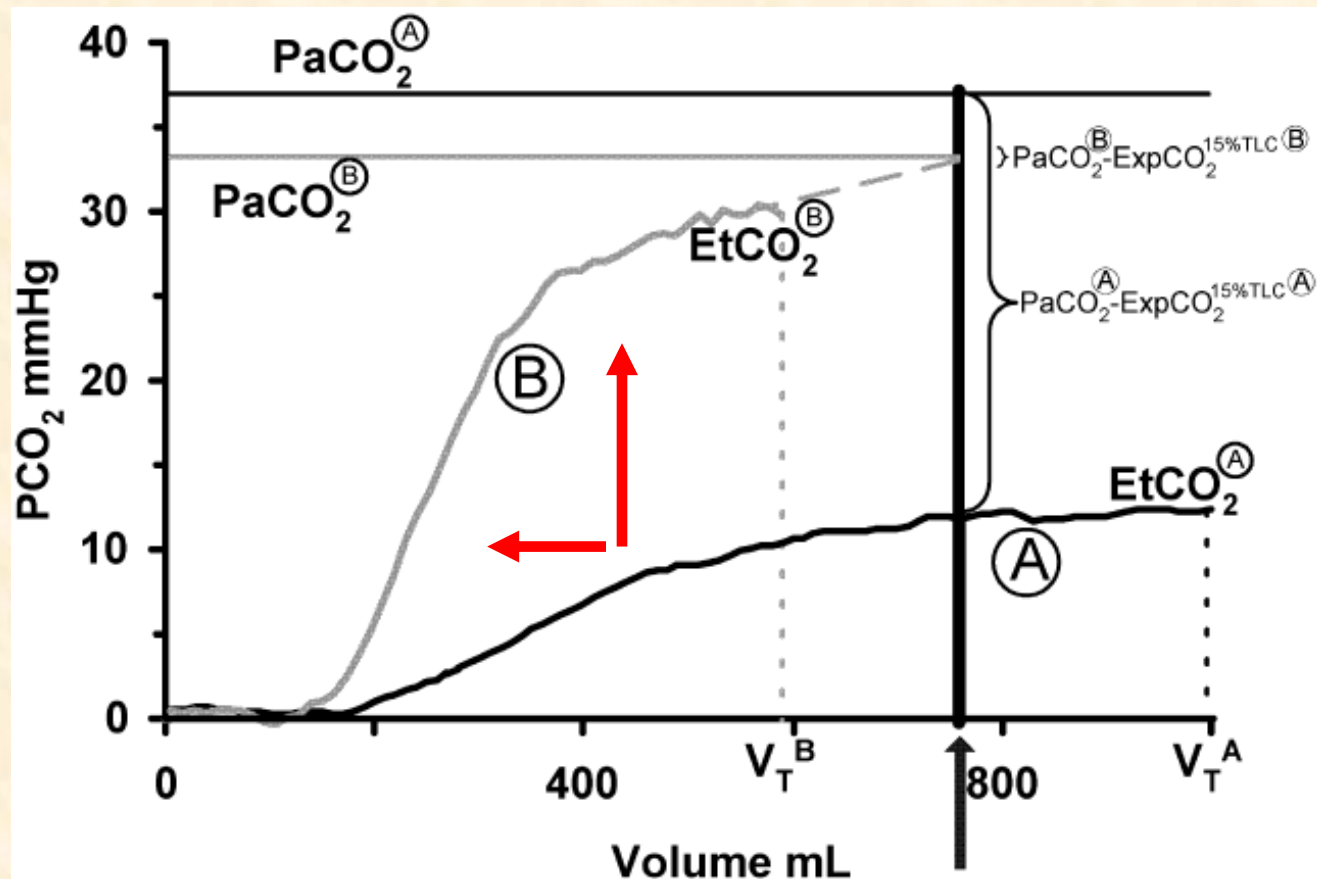
Волюметрическая капнограмма при ТЭЛА

Увеличение фазы I,
снижение фазы II,
значительное
снижение
амплитуды
давления PetCO₂



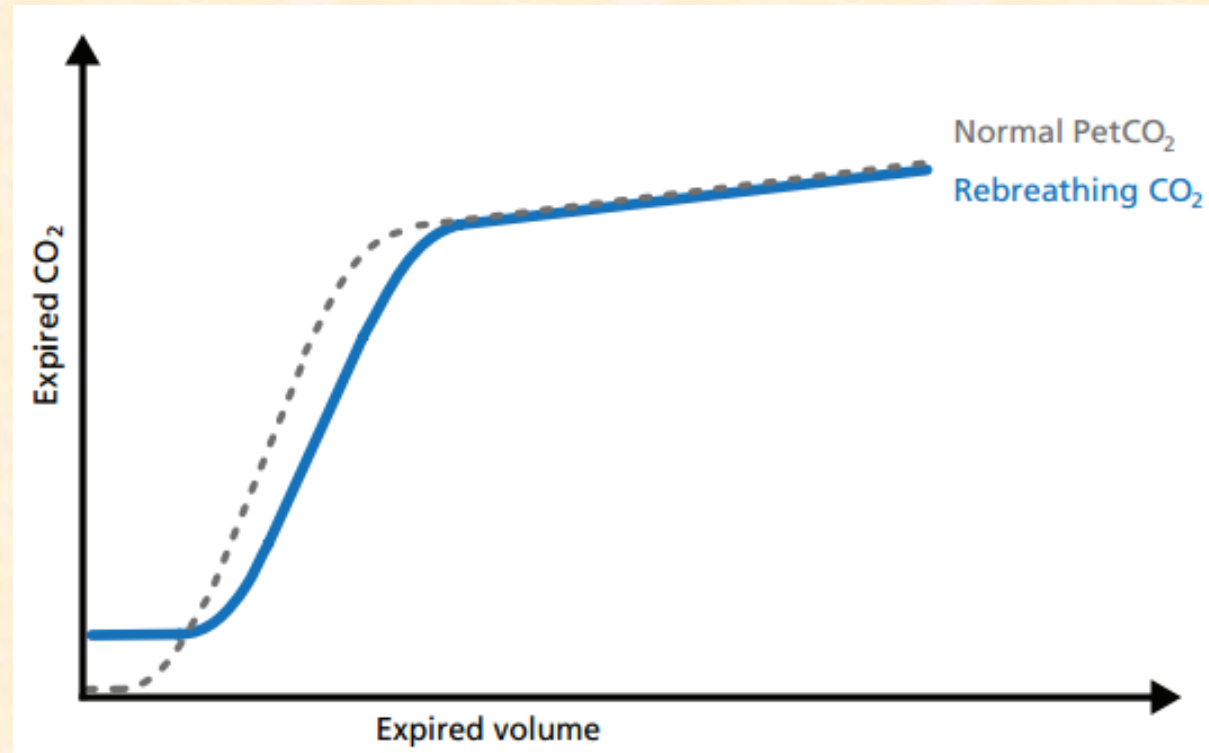
Волюметрическая капнограмма и эффективность тромболизиса при ТЭЛА

А - до ТЛТ
В - после ТЛТ



Увеличение и укорочение фазы II, рост PetCO₂

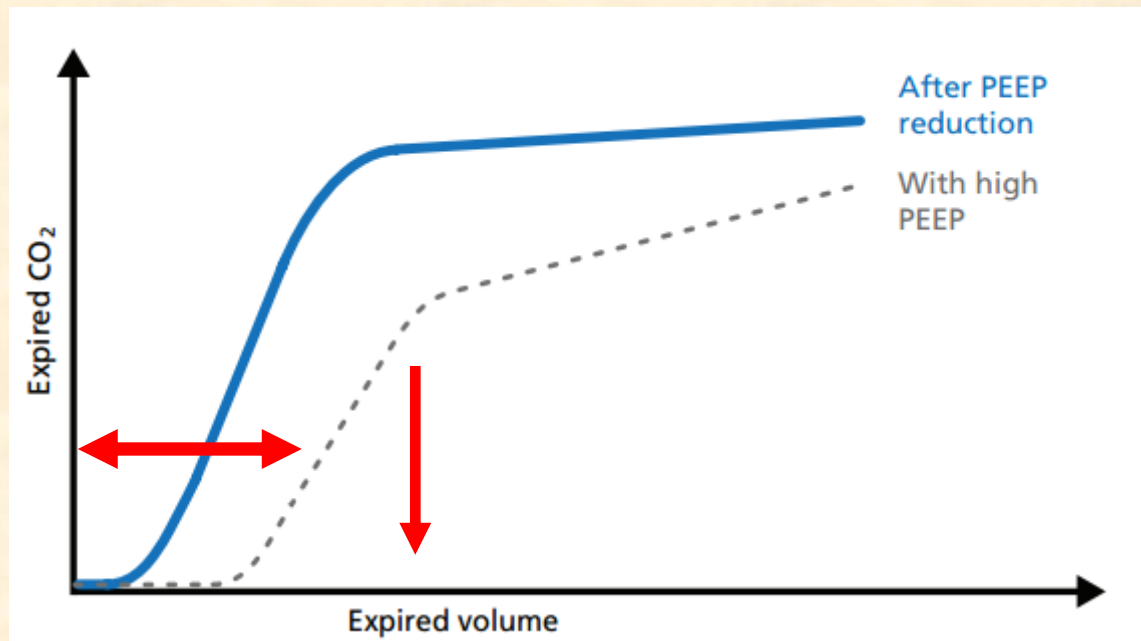
Повторное вдыхание CO₂ (rebreathing)



В 1-й фазе кривая выше изолинии

Волюметрическая капнограмма и слишком высокий РЕЕР

Увеличение фазы I,
умеренное
снижение и
расширение фазы II,
умеренное
увеличение наклона
кривой 3-й фазы



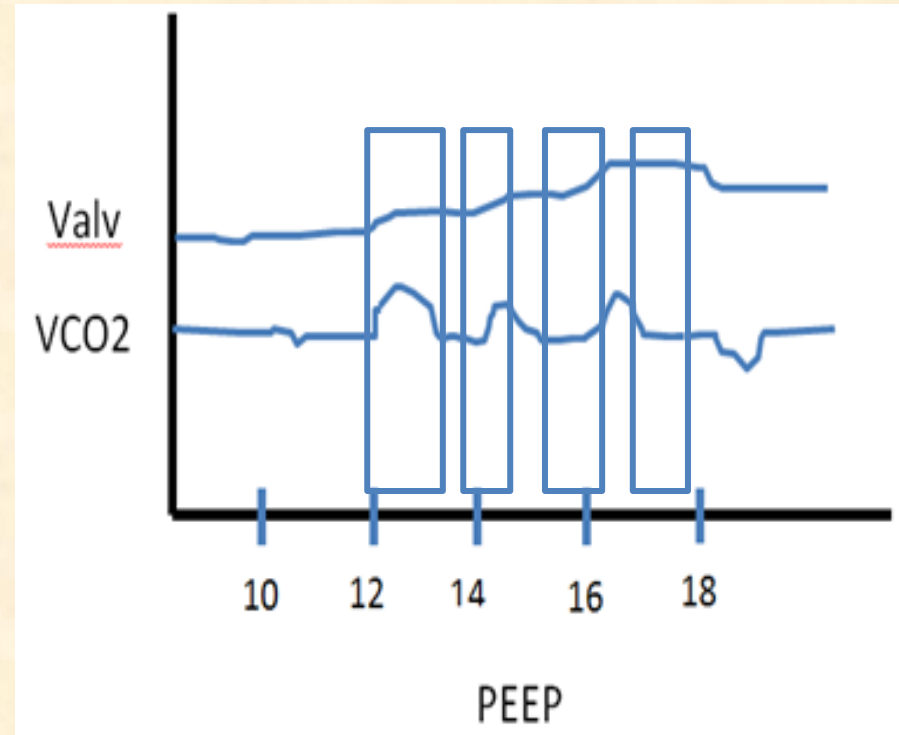
Регулировка PEEP: VCO₂ и Valv

PEEP и тренды VCO₂/Valv:

PEEP 10 cmH₂O – базовая величина

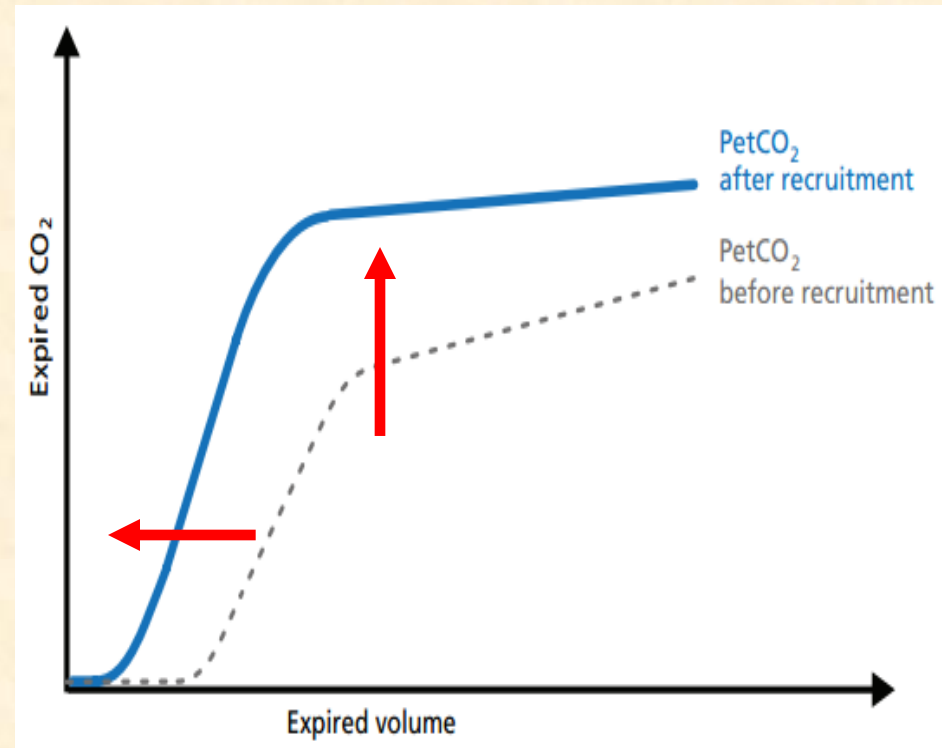
PEEP 12-14-16 cmH₂O – рост Valv
(увеличение эффективной
вентиляции), временное
увеличение VCO₂

PEEP 18 cmH₂O – снижение Valv и
VCO₂ (перераздувание альвеол ?) –
возврат PEEP на 16 cmH₂O



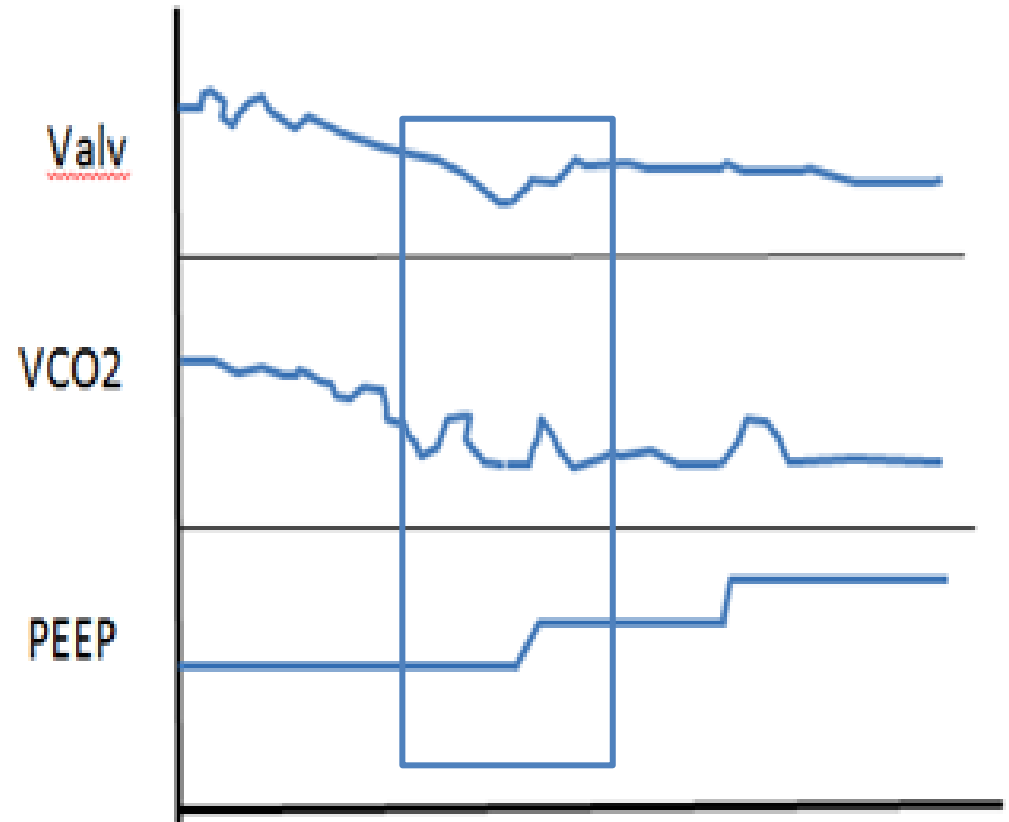
Волюметрическая капнограмма и успешный рекрутмент

- Увеличение V'_{CO_2}
- Уменьшение фазы I
- Рост фазы II, более крутое ее нарастание
- Кривая плато фазы III более пологая



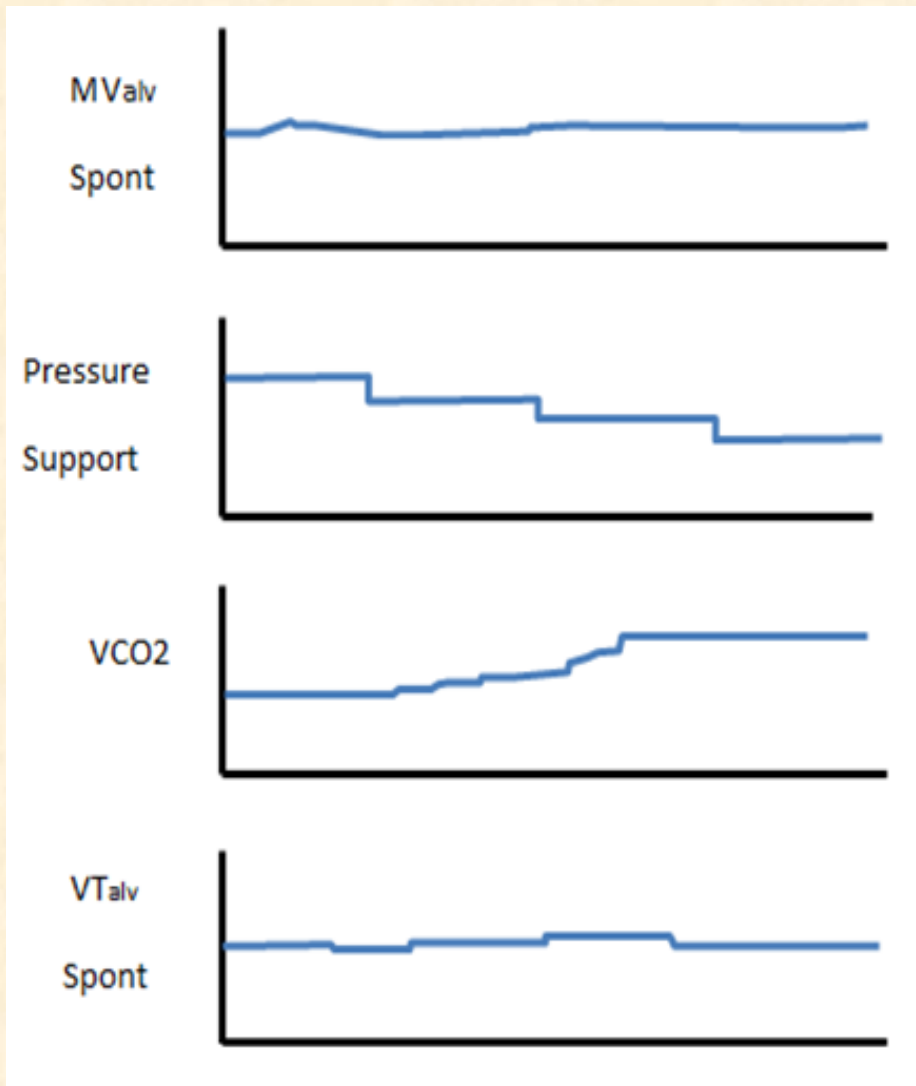
Воллюметрическая капнография и дерекрутмент

- V_{alv} и VCO_2 прогрессивно снижаются



Волюметрическая капнография и «отлучение»

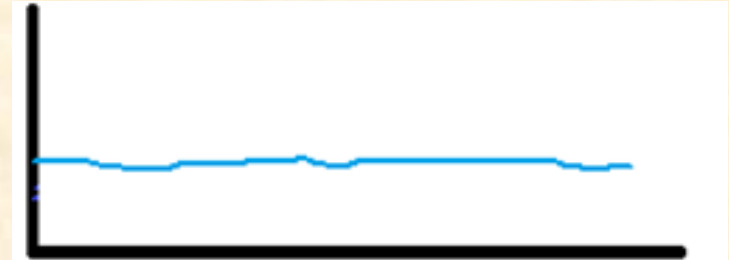
- Снижение респираторной поддержки (Psupport)
- Mvalv / VTalv остается стабильной
- VCO₂ с умеренным ростом и стабилизацией (умеренное увеличение работы дыхания и наработки CO₂)



Воллюметрическая капнография и успешный ТСД

- Стабильные тренды Valv и VCO_2 (в сочетании с спонтанным ДО)

Valv



VCO_2



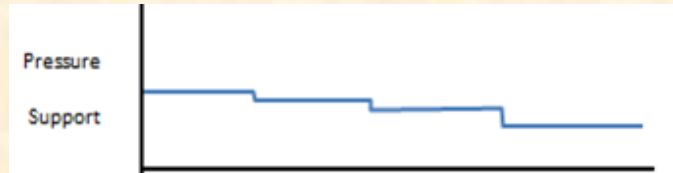
VTspont



Волюметрическая капнография и неуспешный ТСД

- Снижение респираторной поддержки (P_{support})
- Параллельное снижение V_{alv} , V_{CO_2} , V_{talv}
- Рост $V_{\text{D}}/V_{\text{T}}$

P_{support}



V_{alv}



V_{CO_2}



V_{Talv}



$V_{\text{D}}/V_{\text{T}}$



Волюметрическая капнография: клиническое значение

- Важная составная часть респираторного мониторинга
- Неинвазивный метод, в режиме реального времени
- 10 цифровых параметров плюс кривая CO_2 -объем
- Оценка тяжести патологии легочной ткани и дыхательных путей (V_{daw} , VD/VT , V'_{alv} , slopeCO_2)
- Оценка в-п взаимоотношений (VD/VT , VCO_2 , V'_{alv})
- Помощь в регулировке PEEP (VCO_2 , V'_{alv})
- Оценка эффективности рекрутмента
- Динамика уровня метаболизма и перфузии (V'_{CO_2})
- Оценка эффективности лечения ОРДС, ХОБЛ, шока
- Оценка эффективности «отлучения» от ИВЛ
- Прогностические критерии (VD/VT , VCO_2 , V'_{alv})

Волюметрическая капнография



Спасибо за внимание