

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	
Глоссарий.....	
1. Фармакокинетика ингаляционных анестетиков	
Физика и ингаляционные анестетики.....	
Влияние атмосферного давления на парциальное давление анестетика.....	
Доставка анестетика к пациенту	
Доставка анестетика к тканям.....	
Поглощение и распределение анестетика	
Факторы, влияющие на рост F_I	
Факторы, влияющие на рост F_A	
Факторы, влияющие на рост парциального давления анестетика в крови ($P_{\text{КРОВЬ}}$).....	
Минимальная альвеолярная концентрация анестетика	
Гистерезис МАК.....	
Пробуждение.....	
2. Строение и принцип работы наркозно-дыхательного аппарата.....	
Общие принципы строения	
Строение системы высокого давления.....	
Строение системы промежуточного давления	
Строение системы низкого давления	
Строение классического реверсивного дыхательного контура	
APL-клапан	
Мешок-резервуар.....	
Потоковый датчик	
Y-образный коннектор	
Компенсация ПСГ.....	
Работа реверсивного дыхательного контура	
НДА с системой разобщения потоков (декаплинг)	
Вентиляторы.....	
Пневматический вентилятор.....	
Поршневой вентилятор (пистон).....	
Вентилятор с рефлектором.....	
Турбинный вентилятор.....	
Удаление отработанных газов.....	
Абсорбенты углекислого газа.....	
Взаимодействие абсорбента с ингаляционными анестетиками	
3. Проверка оборудования перед работой	
Безопасность при работе с НДА.....	
Причины назначения гипоксической смеси во время анестезии	
Проверка НДА	
Калибровка датчика кислорода	
Проверка системы низкого давления на утечку.....	
Проверка герметичности контура	
Проверка испарителя.....	
Проверка системы удаления отработанных газов.....	
Проверочный лист (чек-лист).....	

4. Низкопоточковая анестезия	51
Парадокс низких потоков	53
Расчет итоговой концентрации газов в контуре	53
Азот, денитрогенация и преоксигенация	57
Оценка потребности в кислороде	58
Стадии НПА	58
Индукция НПА	58
Методы, ускоряющие индукцию анестезии	59
Поддержание НПА	59
Прекращение НПА	59
Закись азота и НПА	59
Преимущества закиси азота	60
Недостатки закиси азота	60
Анестезия по закрытому контуру	60
Работа газоанализатора	63
Накопление дополнительных газов в контуре	64
Учебное программное обеспечение	64
Коэффициент эффективности анестезии (коэффициент Эрнста)	66
Жидкая анестезия	66
Расчет потребления анестетика	69
Метод Фика	69
Модель квадратного корня времени	70
«Жидкая» анестезия изофлюраном	71
«Жидкая» анестезия севофлюраном	71
Математическое обоснование модели квадратного корня времени	72
Общее количество потребленного анестетика	73
4-х компартментная модель Eger	73
Линейная модель Lin	73
Современное представление	74
Оптимальный ПСГ	74
Алгоритмы работы с НПА/МПА	75
Использование смеси O_2/N_2O	75
Использование смеси O_2 /воздух	75
Использование чистого O_2	76
Метод Lerou и соавт.	76
Техника Gothenburg	76
Индукция свержпотоком	76
Инерционная анестезия (коастинг)	77
Пошаговый алгоритм НПА	78
Необходимость изменения глубины анестезии	78
Необходимость изменения объема контура или $F_{I O_2}$	79
Системы автоматического контроля концентрации ингаляционного анестетика	80
Алгоритм действий при тяжелой интраоперационной гипоксии	81
Причины гипоксии	81
Назначение гипоксической смеси	81
Нарушение вентиляции	81
Шунт	82
Нарушение доставки кислорода	82
Увеличение потребления кислорода	82
Немедленные действия при гипоксии	82
Послесловие	83
Список литературы	84

До сих пор нет единого общепризнанного определения для НПА и МПА.

Существует универсальное определение: *любая техника проведения анестезии с ПСГ в меньшей степени, чем альвеолярная вентиляция пациента, относится к НПА.*

Согласно Baum, к НПА относится техника анестезии, при которой не менее 50% выдыхаемого газа возвращается обратно к пациенту после абсорбции CO₂.

Согласно Eger, НПА считается анестезия с ПСГ менее, чем половина минутной вентиляции (как правило, ниже 3 л/мин), а высокопоточковой анестезией – с ПСГ более 5 л/мин.

Традиционно к НПА относят ПСГ <2 л/мин. К минимально потоковой анестезии (МПА) – ПСГ от 0,5 до 1 л, и к анестезии по ЗК – использование метаболических потоков кислорода.

Для проведения НПА, МПА и анестезии по ЗК необходимо наличие реверсивного контура с однонаправленными клапанами, наличие эффективного абсорбента, мешка-резервуара, клапана сброса с соответствующим расположением в дыхательном контуре. Также необходимо обязательное наличие газового мониторинга (включая капнографию).

Низкопоточковая анестезия ведет к существенной экономии ингаляционных анестетиков, и экономия тем больше, чем меньше используемый ПСГ (► Табл. 6). Отображено количество жидкого анестетика в мл. Под заполнением понимается объем анестетика, необходимый для заполнения дыхательного контура и легких пациента. Так, расход севофлюрана при

ПСГ 0,5 л/мин по сравнению с ПСГ 4 л/мин снижается в 3,5 раза. Каждый литр ПСГ, используемый пациентом, ведет к потере ингаляционного анестетика через систему удаления отработанных газов. Так при проведении анестезии севофлюраном с ПСГ 2% каждый литр удаленной в СУОГ смеси несет с собой 20 мл паров неиспользованного севофлюрана.

Преимущества НПА и анестезии по ЗК:

- Существенная финансовая выгода.
- Увлажнение вдыхаемой смеси.
- Поддержание нормальной температуры тела благодаря сохранению тепла.
- Снижение загрязнения окружающей среды.

Недостатки НПА и анестезии по ЗК:

- Необходимость постоянного контроля ПСГ.
- Накопление дополнительных газов в контуре.
- Необходимость в полном газовом мониторинге.

При проведении НПА не обязательно строго придерживаться точного потребления анестетика, в то же время достигается существенная экономия средств и ресурсов, в особенности ингаляционного анестетика [62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69]. При высоком ПСГ стоимость часа анестезии может превышать 30 у.е., в то же время при работе с НПА она составляет менее 10 у.е./ч (► Рис. 26). За счет снижения ПСГ возрастает расход абсорбента, что увеличивает стоимость с 0,14-0,36 евро до 0,56-1,46 евро за 1 час анестезии, что не существенно по сравнению с выгодой от экономии анестетика.

Таблица 6. Потребление анестетика в течение первого часа анестезии в зависимости от размера ПСГ

Анестезия по закрытому контуру			ПСГ, л/мин						
	Заполнение		Общее количество	0,3	0,5	1	2	4	8
Галотан				N/A	5,6	5,8	7,9	11,8	8
Изофлюран	0,75% F _A	0,3	4,1	3,8	4,3	5,3	6,7	13,3	28,7
Севофлюран	1,3% F _A	0,65	4,6	5,6	6,5	7,5	12,2	22,6	50
Десфлюран				9,6	12,3	20,0	34,2	68,1	140,7

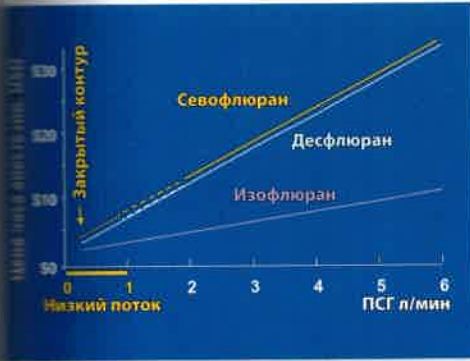


Рис. 26. Зависимость стоимости часа анестезии от расхода ПСГ.

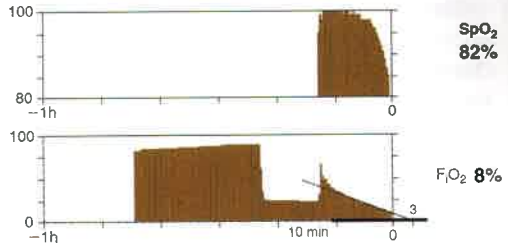


Рис. 27. График изменений SpO_2 (вверху) и F_{iO_2} (внизу) в результате эксперимента с ПСГ 1 литр воздуха в минуту + 0,05 л кислорода в минуту. Пациент 84 кг, НДА Ohmeda Modulus 2 Plus, GE Healthcare. Через 12 минут F_{iO_2} упала до 8%, SpO_2 – до 82%, после чего эксперимент был прекращен.

Парадокс низких потоков

Основной нюанс работы с низким ПСГ – это несоответствие между концентрацией газов, установленной на НДА (F_D), и концентрацией газов на входе (F_I). Это несоответствие часто вводит в заблуждение анестезиологов и вызывает иррациональный страх потери контроля над ситуацией.

Разбежка F_D и F_I тем больше, чем меньше ПСГ, что обусловлено степенью рециркуляции газов в контуре при снижении потоков. Так, при низком потоке кислорода F_{iO_2} будет снижаться вследствие разведения кислорода в контуре.

Чтобы лучше объяснить парадокс низких потоков свежего газа, приведем наглядный пример.

Если потребление кислорода составляет 180-200 мл/мин, можно ли вентилировать воздухом пациента при помощи ПСГ 1 л/мин, учитывая, что количество кислорода в 1 литре воздуха составляет 210 мл (21%)?

Теоретически доставка кислорода превышает потребление, что может казаться достаточным, однако на практике F_{iO_2} снижается до 14-15% в течение 2 минут (Рис. 27) (www.navat.org/cm/ota-textbook).

Этот феномен объясняется рециркуляцией газа. Так, литр воздуха содержит почти 79% азота (790 мл). Поскольку из литра поступившей смеси забирается практически весь кислород, то 790 мл

азота, накапливающиеся в контуре за минуту вентиляции, увеличивают объем контура, что вызывает сброс избытка смеси в СУОГ. Понятно, что удаляется не один только азот, а 790 мл общего, смешанного газа, находящегося в контуре, включая и оставшийся кислород, что снижает его концентрацию в контуре. Происходит разведение поступающего кислорода преимущественно азотом, накапливающимся в контуре при рециркуляции газов. Дополнительно для определения состава газа часть газовой смеси забирается газоанализатором со скоростью 200 мл/мин, что увеличивает потери кислорода.

Следует помнить, что при снижении $F_{iO_2} < 21\%$ вследствие разведения кислорода в контуре защитные механизмы НДА, направленные на предотвращение подачи гипоксической смеси (устройства пропорциональной подачи газа – снижающие поток N_2O при снижении потока O_2), не активируются.

Расчет итоговой концентрации газов в контуре

Итоговая концентрация газов в контуре равна разнице между потоком, поступившим в контур (собственно ПСГ), и потреблением газов:

Итоговая концентрация = ПСГ – потребление

Допустим, что среднее потребление кислорода при длительной анестезии составит 200 мл/мин, среднее потребление закиси азота – 100 мл/мин.

Пример 1. ПСГ = 1 л/мин воздух, потребление кислорода 0,2 л/мин.

	Величина потока	Азот	Кислород
ПСГ, воздух	1,0*	0,8	0,2
Потребление	-0,2	-0,0	-0,2
Чистый остаток	0,8	0,8	0,0

* Все значения приведены в л/мин.

Итоговая $F_1O_2 = 0,0/0,8 = 0\%$ = смерть пациента

Т. е. весь кислород, поступающий в контур, расходуется пациентом, остается поступивший азот. С каждым выдохом пациента азот разбавляет количество поступившего в контур кислорода, приводя к последовательному снижению F_1O_2 .

Чтобы избежать этого, достаточно добавить небольшой поток кислорода в состав ПСГ (+0,2 л/мин):

Пример 2. ПСГ 1,2 л/мин (1,0 л/мин воздух + 0,2 л/мин кислород).

	Величина потока	Азот	Кислород
ПСГ, воздух	1,0	0,8	0,2
ПСГ, кислород	0,2	0,0	0,2
Потребление	-0,2	-0,0	-0,2
Чистый остаток	1,0	0,8	0,2

Итоговая $F_1O_2 = 0,2/1,0 = 20\%$, состав эквивалентен воздуху

При использовании смеси O_2 /воздух в любой пропорции итоговая концентрация газов рассчитывается приведенным выше образом. Так, комбинация $O_2 = 0,1$ л/мин и воздуха = 0,4 л/мин приводит к образованию гипоксической смеси, а комбинация потоков O_2 0,2 л/мин и воздуха 0,3 л/мин обеспечивает $F_1O_2 \approx 30\%$.

Таблица 7. Разница между F_D и F_1 при использовании кислородно-воздушной смеси

	Соотношение O_2 /воздух, л/мин	F_D , %	F_1 , %
МПА 0,5 л/мин	0,1/0,4	37	<21
	0,2/0,3	53	33
	0,3/0,2	68	51
	0,4/0,1	84	72
НПА 1 л/мин	0,0/1,0	21	<21
	0,2/0,8	37	29
	0,4/0,6	53	45
	0,6/0,4	68	63
	0,8/0,2	84	81

Следовательно, пропорция O_2 в ПСГ должна возрастать при снижении ПСГ л/мин! (→ Табл. 7). Следует обратить внимание, что даже при достаточной доставке кислорода в контур ($F_D = 37\%$ и 21% при использовании ПСГ 0,5 л/мин и 1 л/мин) может образоваться гипоксическая смесь.

Пример 3. Высокий ПСГ 8 л/мин (5,0 л/мин закись азота + 3,0 л/мин кислород).

	Величина потока	Закись азота	Кислород
ПСГ	8,0	5,0	3,0
Потребление	-0,3	-0,1	-0,2
Чистый остаток	7,7	4,9	2,8

Итоговая $F_1O_2 = 2,8/7,7 = 36,3\%$. В ПСГ $F_D O_2$ будет составлять 37,5% (3,0/8,0). Таким образом, инспираторная концентрация газов при высоком ПСГ практически не будет отличаться от F_D .

Пример 4. НПА с ПСГ 1,0 л/мин (0,5 л/мин закись азота + 0,5 л/мин кислород).

	Величина потока	Закись азота	Кислород
ПСГ	1,0	0,5	0,5
Потребление	-0,3	-0,1	-0,2
Чистый остаток	0,7	0,4	0,3

Итоговая $F_iO_2 = 0,3/0,7 = 43\%$, но никак не 50% (0,5/1,0), как F_D .

Пример 5. Неправильное соотношение газов при НПА. Использование классической схемы для высокопоточковой анестезии с соотношением кислород/закись азота 1:2.

	Величина потока	Закись азота	Кислород
ПСГ	0,9	0,6	0,3
Потребление	-0,3	-0,1	-0,2
Чистый остаток	0,6	0,5	0,1

Итоговая $F_iO_2 = 0,1/0,6 = 16,6\%$ = гипоксическая смесь

Пример 6. МПА с ПСГ 0,6 л/мин, соотношение кислород/закись азота =1:1

	Величина потока	Закись азота	Кислород
ПСГ	0,6	0,3	0,3
Потребление	-0,3	-0,1	-0,2
Чистый остаток	0,3	0,2	0,1

Итоговая $F_iO_2 = 0,1/0,3 = 33\%$, что снова отличается от $50\% F_D$.

Пример 7. Анестезия по закрытому контуру: ПСГ 0,2 л/мин кислород.

	Величина потока	Азот	Кислород
ПСГ	0,2	0,0	0,2
Потребление	-0,2	-0,0	-0,2
Чистый остаток	0,0	0,0	0,0

Итоговая $F_iO_2 = 0,0/0,0 = \text{error}$.

На самом деле концентрация кислорода в этом случае будет задаваться исходной концентрацией азота и кислорода в контуре. Так, при заполнении контура смесью с $F_iO_2 = 60\%$ и последующим переключением на закрытый контур с ПСГ 0,2 л/мин чистого O_2 концентрация кислорода в контуре останется 60%. Со временем она может немного уменьшаться, что обусловлено выделением растворенного в тканях азота в контур. На практике добиться абсолютной денитрогенации очень сложно, поэтому данный пример является гипотетическим. Даже если пациент выдохнет весь азот при проведении денитрогенации перед началом анестезии, со временем в дыхательный контур будет выделяться азот, растворенный в тканях. В среднем скорость выделения азота составляет 10 мл/мин [70, 71]. Но даже при использовании закрытого контура у взрослых концентрация азота не должна увеличиваться более чем на 10-18% [72, 73].

Вышеописанным правилам подчиняются все газообразные анестетики.

Так, потребление севофлюрана на 9-й минуте анестезии составляет в среднем около 27 мл/мин. Если при ПСГ 250 мл/мин на 9-й минуте анестезии выставить максимальную концентрацию севофлюрана на испарителе 8%, то количество севофлюрана в ПСГ будет составлять 20 мл ($0,08 \times 250 = 20$ мл).

округляется до 300 мл/мин для кислорода и 300 мл/мин для закиси азота, установки испарителя остаются 3% для изофлюрана и галотана.

Следует помнить, что после смены абсорбента F_1 анестетика может снижаться вследствие потребления анестетика свежим абсорбентом. При этом концентрация анестетика на выдохе изменяется очень медленно, что может привести к задержке своевременной коррекции F_D анестетика, если анестезиолог следит только за экспираторной концентрацией анестетика.

Накопление дополнительных газов в контуре

При длительной анестезии по ЗК, а также при МПА в дыхательном контуре могут накапливаться дополнительные газы.

1. Моноксид углерода (CO) (см. раздел «Абсорбенты углекислого газа»). Образуется вследствие взаимодействия анестетиков с абсорбентом, а также вследствие распада гемоглобина или накапливается с выдыхаемым воздухом у курильщиков.
2. Азот. Ткани содержат до 0,7 л растворенного в них азота. Азот из тканей медленно выделяется в дыхательный контур со скоростью примерно 10 мл/мин и вызывает медленный рост концентрации в контуре до 10-18%.
3. Ацетон, метан, этанол, иные инертные газы. Так, у пациентов с кетоацидозом может накапливаться ацетон, у пациентов в состоянии алкогольного опьянения – пары этилового спирта. Метан вырабатывается кишечными бактериями и выделяется в том числе через легкие. Следует помнить, что метан влияет на работу инфракрасного газового анализатора.

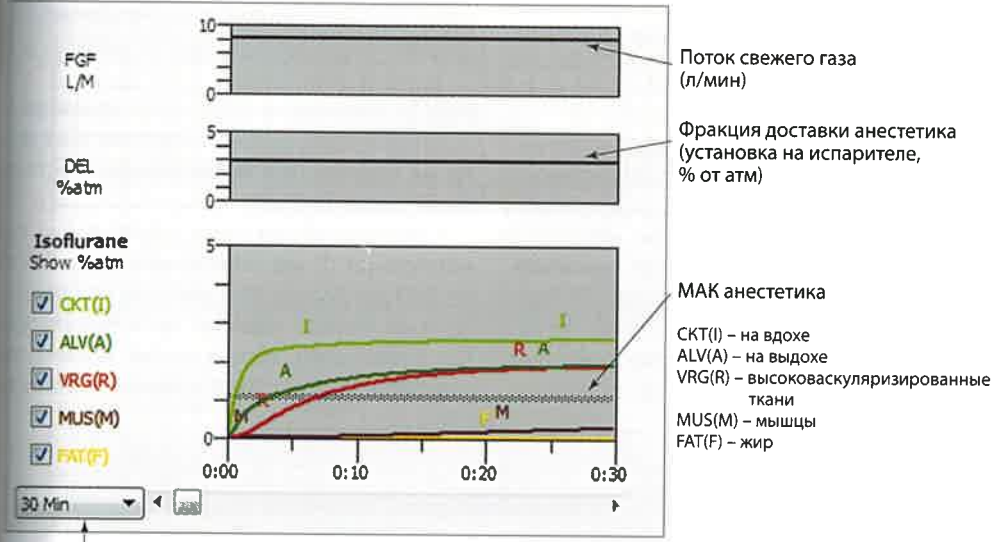
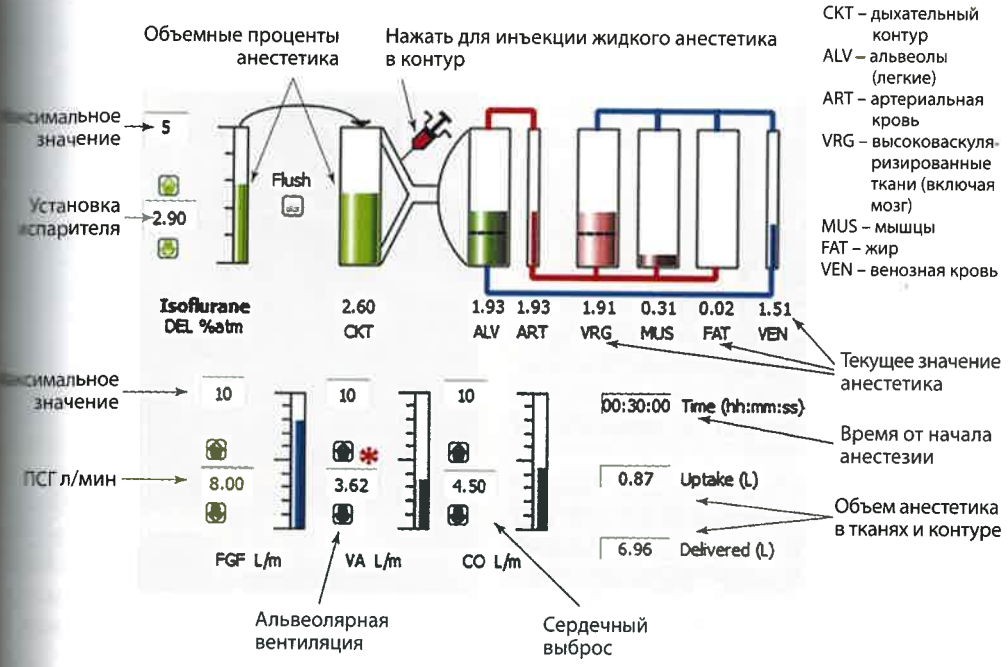
4. Углекислый газ при лапароскопических операциях или иных инвазиях CO_2 (эндоскопия).
5. Мономеры акрила при протезировании суставов и использовании костного цемента. При проведении цементирования анестезия по ЗК должна быть переведена в анестезию с использованием высокопоточной ПСГ для предотвращения рециркуляции химических веществ.

Для вымывания азота из дыхательного контура необходимо увеличивать ПСГ в 2-3 кратность приблизительно один раз в час в течение 1 минуты либо при внезапном необъяснимом снижении концентрации анестетиков и кислорода в контуре.

Накопление азота имеет значение при проведении МПА и анестезии по ЗК с использованием N_2O , поскольку поступающая занимает основной процент газовой смеси. Если закись азота не используется, то азот в контуре может быть полезен для предотвращения абсорбционных ателектазов и токсичности кислорода при использовании высокой концентрации O_2 .

Учебное программное обеспечение

Компьютерная программа GasMan® (MacMan Simulations, Chestnut Hill, MA, USA) используется для освоения принципов МПА и анестезии с использованием ЗК (www.gasmanweb.com/index.html) [82]. Данная программа отображает ингаляционную кинетику и модели распределения анестетика в компартментах организма, показывая парциальное давление анестетика в каждом компартменте (► Рис. 30). Эта программа допускает, однако, некоторые упрощения. Например, $F_{\text{ЦНС}}$ условно заменена на F_{VRG} (концентрация анестетика в высокоvascularизированных тканях – vessel-rich group).



Длительность отображаемого интервала

Рис. 31. Интерфейс программы GasMan® (Med Man Simulations, Chestnut Hill, MA, USA).