



УДК 612.216.3

## ОБЗОР И СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ ЛЕГКИХ

*В.А. Лях, А.В. Реков*

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова,  
г. Новочеркасск

В данной статье проводится обзор и сравнительная оценка методов искусственной вентиляции легких (ИВЛ) – процессов вдувания газа в дыхательные пути по его объему или по времени с установленной скоростью. Описаны процессы, происходящие в процессе дыхания человека. Рассмотрены проблемы, связанные с дыхательной недостаточностью, требующие подключения человека к системе с искусственной вентиляцией легких. Проведен обзор следующих методов: традиционная ИВЛ (с положительным давлением в конце выдоха, с ограничением давления на вдохе, с инспираторной паузой), ИВЛ с управляемым давлением и инверсированным отношением вдох:выдох, высокочастотная (осцилляторная и струйная) ИВЛ. Методы искусственной вентиляции легких проиллюстрированы кривыми давления и потока в дыхательных путях. Обзоры методов сопровождаются особенностями их применения.

**Ключевые слова:** ИВЛ, вентиляция легких, дыхательная недостаточность.

## REVIEW AND COMPARATIVE EVALUATION OF METHODS OF ARTIFICIAL LUNG VENTILATION

*V.A. Lyakh, A.V. Rekov*

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI),  
Novocherkassk

This article provides a review and comparative assessment of artificial lung ventilation (ALV) methods - the processes of gas injection into the respiratory tract by its volume or by time at a set rate. The processes occurring in the process of human respiration are described. Problems associated with respiratory failure, requiring a person to be connected to a system with artificial lung ventilation, are considered. The following methods are reviewed: traditional ventilation (with positive pressure at the end of expiration, with limited pressure during inspiration, with inspiratory pause), mechanical ventilation with controlled pressure and inverted inhalation: exhalation ratio, high-frequency (oscillatory and jet) ventilation. Ventilation techniques are illustrated with airway pressure and flow curves. Method reviews are accompanied by specifics of their application.

**Keywords:** ALV, ventilation of the lungs, respiratory failure.

Обмен газами между клетками и окружающей средой называется дыханием. В организме человека процесс дыхания складывается из следующих этапов:

1. Газообмен между внешней средой и альвеолами – вентиляция альвеол;
2. Обмен между газами альвеол и газами крови в легочных капиллярах;
3. Транспорт газов кровью к тканям и от них;
4. Обмен газов в тканевых капиллярах между кровью и тканями и использование кислорода клетками тканей.

Первая и вторая стадии относятся к внешнему дыханию, которое осуществляется благодаря изменению объема грудной клетки и сопутствующему изменению объема легких. Во время вдоха объем грудной клетки увеличивается, а во время выдоха - уменьшается.

В дыхательных движениях участвуют:



1. Дыхательные пути, которые по своим свойствам являются слегка растяжимыми, сжимаемыми. Они создают поток воздуха.

2. Респираторный отдел представлен альвеолами. В легких имеется три типа альвеолоцитов (пневмоцитов), выполняющих разную функцию. Общая площадь альвеол у взрослого человека достигает 80-90 м<sup>2</sup>, т.е. примерно в 50 раз превышает поверхность тела человека.

Работа, выполняемая дыхательными мышцами при дыхании, направлена на преодоление неэластичного и эластичного сопротивления.

Внутриплевральное давление, или давление в герметично замкнутой плевральной полости в норме является отрицательным относительно атмосферного. При открытых верхних дыхательных путях давление во всех отделах легких равно атмосферному. Перенос атмосферного воздуха в легкие происходит при появлении разницы давлений между внешней средой и альвеолами легких. При каждом вдохе объем легких увеличивается, давление заключенного в них воздуха, или внутрилегочное давление, становится ниже атмосферного, и воздух засасывается в легкие. При выдохе объем легких уменьшается, внутрилегочное давление повышается и воздух выталкивается из легких в атмосферу. Внутриплевральное давление обусловлено эластической тягой легких или стремлением легких уменьшить свой объем.

Важным фактором, влияющим на эластичность и растяжимость легких, является поверхностное натяжение жидкости в альвеолах. Спадению альвеол препятствует сурфактант, липидно-белковый комплекс, выстилающий внутреннюю поверхность альвеол, он также препятствует выходу жидкости на поверхность альвеол из плазмы капилляров легкого.

Величина легочной вентиляции определяется глубиной дыхания и частотой дыхательных движений. Количественной характеристикой легочной вентиляции служит минутный объем дыхания (МОД) - объем воздуха, проходящий через легкие за 1 минуту. В покое частота дыхательных движений человека составляет примерно 16 в 1 минуту, а объем выдыхаемого воздуха - около 500 мл. МОД у человека в покое составляет в среднем 8 л/мин.

Воздух, находящийся в воздухоносных путях (полость рта, носа, глотки, трахеи, бронхов и бронхиол), не участвует в газообмене, и поэтому пространство воздухоносных путей называют вредным или мертвым дыхательным пространством. Во время спокойного вдоха объемом 500 мл в альвеолы поступает только 350 мл вдыхаемого атмосферного воздуха. Остальные 150 мл задерживаются в анатомическом мертвом пространстве. Это пространство является «мертвым» лишь в том смысле, что в нем не происходит газообмена: однако структуры, образующие мертвое пространство, выполняют важные вспомогательные функции – обеспечивают вентиляцию легких, очищение, увлажнение и согревание вдыхаемого воздуха.

Газообмен  $O_2$  и  $CO_2$  через альвеолярно-капиллярную мембрану происходит с помощью диффузии, которая осуществляется в два этапа. На первом этапе диффузионный перенос газов происходит через аэрогематический барьер, на втором - происходит связывание газов в крови легочных капилляров, объем которой оставляет 80-150 мл при толщине слоя крови в капиллярах всего 5-8 мкм.



Плазма крови практически не препятствует диффузии газов, в отличие от мембраны эритроцитов.

Структура легких создает благоприятные условия для газообмена: дыхательная зона каждого легкого содержит около 300 млн. альвеол и примерно такое же число капилляров, имеет площадь 40-140 м<sup>2</sup>, при толщине аэрогематического барьера всего 0,3-1,2 мкм. Особенности диффузии газов количественно характеризуются через диффузионную способность легкие. Для кислорода O<sub>2</sub> диффузионная способность легких - это объем газа, переносимого из альвеол в кровь в 1 минуту при градиенте альвеолярно-капиллярного давления газа, равном 1 мм рт.ст. Движение газов происходит в результате разницы парциальных давлений. Градиент парциального давления кислорода и углекислого газа это – сила, с которой молекулы этих газов стремятся проникнуть через альвеолярную мембрану в кровь. Парциальное напряжение газа в крови или тканях - это сила, с которой молекулы растворимого газа стремятся выйти в газовую среду. Кровь человека содержит примерно 700 - 800 г гемоглобина и может связывать 1 л кислорода. Под кислородной емкостью крови понимают количество O<sub>2</sub> которое связывается кровью до полного насыщения гемоглобина.

Дыхательная недостаточность – состояние организма, при котором либо не обеспечивается поддержание нормального напряжения O<sub>2</sub> и CO<sub>2</sub> в артериальной крови, либо оно достигается за счет повышенной работы внешнего дыхания, приводящей к снижению функциональных возможностей организма, либо поддерживается искусственным путем.

Искусственную вентиляцию легких (ИВЛ) применяют ежедневно у многих тысяч больных во время операционных вмешательств и в процессе интенсивной терапии.

ИВЛ называют обеспечение газообмена между окружающим воздухом (или специально подобранной смесью газов) и альвеолярным пространством легких искусственным образом.

В комплексе современной анестезии ИВЛ должна обеспечивать нормальный газообмен в легких в условиях искусственно выключенного самостоятельного дыхания больного во время оперативных вмешательств.

Основными задачами ИВЛ в интенсивной терапии являются обеспечение адекватного метаболическим потребностям организма газообмена в легких и полное освобождение больного от работы дыхания.

Наряду с указанными ИВЛ должна решать еще ряд задач:

- обеспечивать свободу действия хирурга;
- оказывать минимальное повреждающее действие на легкие, дыхательные пути и гемодинамику;
- восстанавливать нарушенные вентиляционно-перфузионные отношения в легких;
- предупреждать инфицирование дыхательных путей.

Ликвидируя гипоксию (недостаток содержания O<sub>2</sub>), а иногда и гиперкапнию (избыток CO<sub>2</sub>), ИВЛ обеспечивает предотвращение развитие в паренхиматозных органах необратимых изменений и благоприятно влияет на их функцию.



Основным и, пожалуй, единственным методом ИВЛ в настоящее время является вдувание газа в дыхательные пути. При этом либо в них вводится определенный объем газовой смеси, либо она вдувается в легкие в течении определенного времени с заданной скоростью, либо подается до тех пор, пока давление в дыхательном контуре (системе больной – респиратор) не повысится до определенного уровня. В любом случае ИВЛ заменяет естественный акт внешнего дыхания путем создания положительного давления в начале дыхательных путей.

Для ИВЛ характерна общая черта – ритм работы респиратора задается врачом и не зависит от больного. В связи с этим аппараты ИВЛ разделяют по способу переключения с вдоха на выдох: по времени, по объему, по давлению, по ручному управлению.

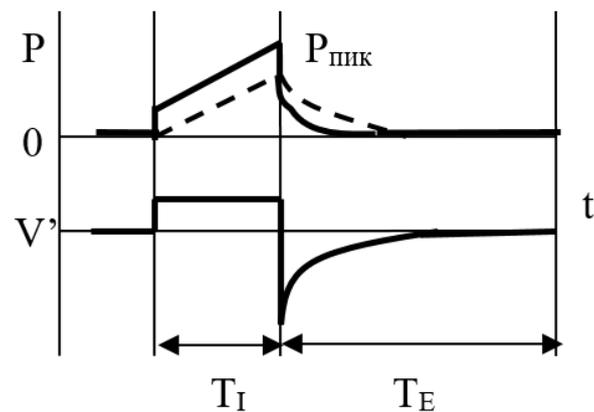
Наибольшее распространение в анестезиологии и интенсивной терапии получил метод ИВЛ, при котором респиратор вводит в дыхательные пути больного газовую смесь заданного объема или с заданным давлением. При этом в дыхательных путях и легких создается повышенное давление. После прекращения искусственного вдоха подача газа в легкие прекращается и происходит выдох, во время которого давление снижается. Группа таких методов получила название «ИВЛ с перемежающимся положительным давлением» или «управляемая механическая вентиляция легких».

Традиционная ИВЛ. Чаще всего используется метод ИВЛ, при котором в легкие во время вдоха респиратор вводит заданный дыхательный объем – «объемная ИВЛ» или «традиционная ИВЛ».

При традиционной ИВЛ в зависимости от конструктивных особенностей респиратора можно задавать либо дыхательный –  $VT$ , либо минутный объем –  $VE$  вентиляции, либо обе величины. Частоту дыхания –  $f$  чаще устанавливают независимо от других параметров или она является производной –  $V'E/VT$ . Давление в дыхательных путях во время вдоха является производной величиной и зависит от  $VT$ , длительности вдоха, формы кривой потока, сопротивления дыхательных путей, растяжимости легких и грудной клетки.

Переключение со вдоха на выдох при традиционной ИВЛ осуществляется либо после окончания времени вдоха  $VI$  при заданном времени, либо после введении в легкие заданного объема, если отдельно задаются  $VT$  и  $VE$ . Выдох происходит после открытия клапана, воздух выходит из дыхательных путей под действием эластической тяги легких и грудной клетки.

На рисунке 1 представлена кривая давления, создаваемого в дыхательных путях респиратором.



**Рис. 1 – Кривые давления ( $P$ ) и потока ( $V$ ) в дыхательных путях, создаваемые респиратором РО-5 (пунктиром обозначено внутреннее давление)**

Как видно, давление в начале вдоха повышается быстро, затем, по мере заполнения легких газом темп прироста давления снижается. После достижения  $P_{\text{пик}}$  и окончания вдоха происходит выдох и давление быстро снижается до нуля. Скорость потока во время вдоха остается постоянной.

Важным регулируемым параметром традиционной ИВЛ является отношение времени вдох:выдох ( $T_I:T_E$ ), от которого во многом зависит среднее давление в дыхательных путях во время всего дыхательного цикла.

Большинство авторов 50-70х годов считали необходимым, чтобы вдох был короче выдоха. «Идеальным» считалось отношение  $T_I:T_E = 1:2$ , которое и сейчас широко используется. Однако позже было установлено, что чем продолжительнее вдох, тем лучше распределение дыхательного газа в легких при патологических процессах в них. Поэтому в современных респираторах реализована возможность регулировать  $T_I:T_E$  в широких пределах – от 1:4 до 4:1. Увеличение отношения  $T_I:T_E$  позволяет, не уменьшая  $V_T$ , снизить  $P_{\text{пик}}$  и скорость вдувания, что очень важно в плане профилактики баротравмы легких.

Все отношения больше чем 1:1 называют инверсированными.

Определенное значение имеет форма кривой потока во время вдоха. Существует четыре формы (или типа) кривых:

- 1) постоянный поток во время вдоха (рис. 2.а);
- 2) снижающийся поток, при котором максимум скорости приходится на начало вдоха, или рампообразная кривая (рис. 2.б);
- 3) возрастающий поток, при котором максимум скорости приходится на конец вдоха (рис. 2.в);
- 4) синусоидальный поток, при котором максимум скорости приходится на середину вдоха (рис. 2.г).

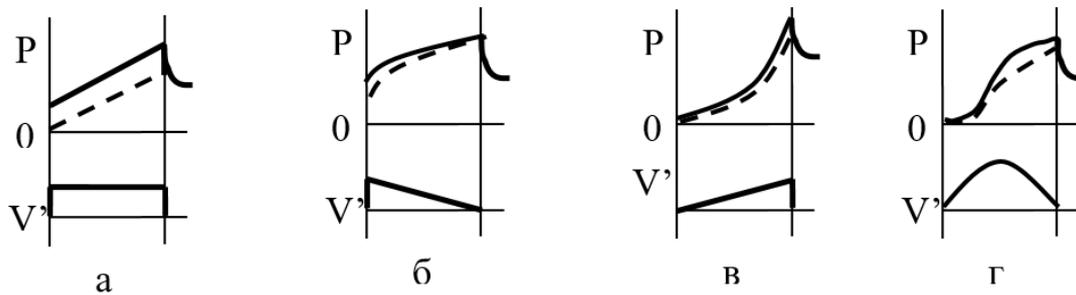


Рис. 2 – Кривые давления ( $P$ ) и потока ( $V'$ ) в дыхательных путях при различных потоках во время вдоха

Установлена прямая связь между типом кривой потока и давлением в дыхательных путях. Анализ кривых потока показал, что минимальная величина среднего давления в дыхательных путях свойственна возрастающей форме кривой потока.

Традиционная ИВЛ с инспираторной паузой. Одной из разновидностей традиционной ИВЛ является традиционная ИВЛ с инспираторной паузой. На кривой давления имеется плато (инспираторная пауза) – статическая фаза, когда после окончания вдоха поток прерывается и в легких на заданное время создаются статические условия; происходит выравнивание давления между разными участками с различной постоянной времени (рис. 3).

Режим ИВЛ с плато широко используется в повседневной практике интенсивной терапии и реализуется во всех современных респираторах.

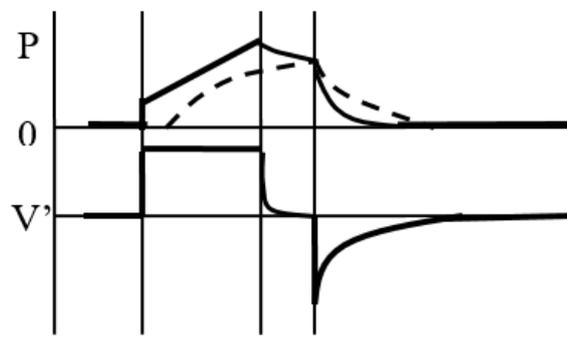


Рис. 3 – Режим традиционной ИВЛ с инспираторной паузой

Режим традиционной ИВЛ с ограничением давления на вдохе. ИВЛ с ограничением  $P_{\text{пик}}$  используют у больных, для которых увеличение  $P_{\text{пик}}$  выше определенного предела опасно из-за высокой вероятности баротравмы. Этот режим может быть реализован любым респиратором, снабженным регулируемым предохранительным клапаном. Клапан регулируют так, чтобы он срабатывал при определенном давлении, например, 40 или 25 см вод.ст. При превышении  $P_{\text{пик}}$  этого предела часть вдуваемого газа будет сброшена в атмосферу и давление в дыхательных путях не будет выше установленного. Можно установить ограничение давления так, чтобы оно было ниже  $P_{\text{пик}}$ , но выше  $P_{\text{плат}}$ . При этом кривая давления в дыхательных путях приобретает специфическую форму (рис. 4). следует, однако, иметь в виду, что при таком режиме часть дыхательного



объема будет постоянно уходить в атмосферу и заданный МОД не будет обеспечен, поэтому необходим мониторинг МОД.

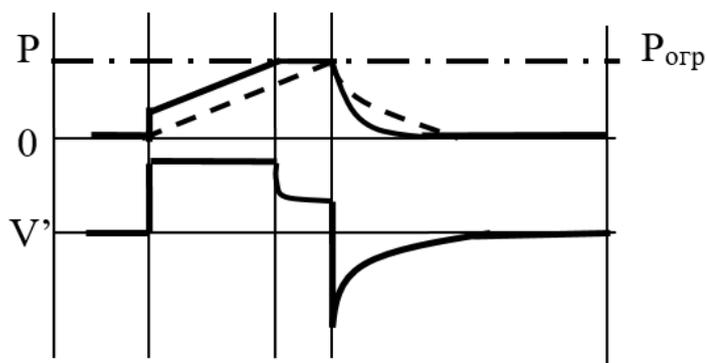


Рис. 4 – Режим традиционной ИВЛ с ограничением давления. Пунктиром обозначено внутрилегочное давление.

Режим традиционной ИВЛ с положительным давлением в конце выдоха (ПДКВ). Суть методики заключается в том, что во время фазы выдоха давление в легких не снижается до нуля, а удерживается на заданном уровне (рис. 5).

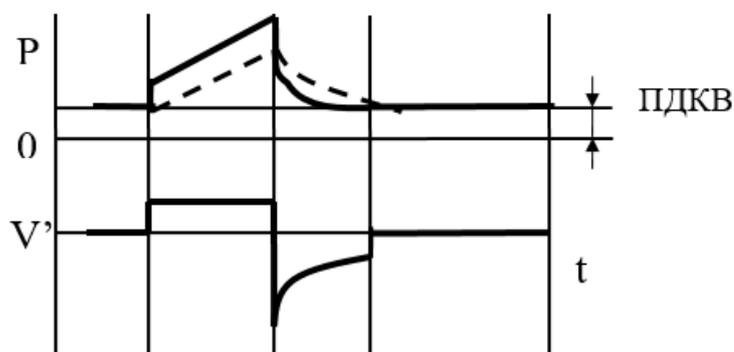


Рис. 5 – Режим традиционной ИВЛ с ПДКВ

ПДКВ достигается при помощи специального блока, который не препятствуя началу выдоха, затем удерживает давление на заданном уровне, либо перекрывая линию выдоха дыхательного контура, либо направляя в дыхательные пути больного дозированный газовый поток, препятствующий дальнейшему снижению давления. Менее целесообразно использование разного рода диафрагм, поскольку они с самого начала выдоха создают сопротивление потоку, и не позволяют регулировать давление в широких пределах.

Исследованиями установлено, что ПДКВ, при котором внутрилегочное давление в течении всего дыхательного цикла остается выше атмосферного, способствует оптимизации распределения воздуха в легких, увеличению функциональной остаточной емкости легких с возрастанием их остаточного объема и резервного объема выдоха, снижению венозного шунта за счет включения в вентиляцию спавшихся групп альвеол, улучшению вентиляции нижних отделов легких и повышению их растяжимости.



Из сказанного выше можно сделать вывод, что традиционная ИВЛ предоставляет врачу возможность использовать многие режимы и модификации, которые целесообразно применять при проведении анестезии и интенсивной терапии в зависимости от показаний и состояния конкретного больного. Также, традиционную ИВЛ можно сочетать с другими методами и способами искусственной и вспомогательной вентиляции.

ИВЛ с управляемым давлением и инверсированным отношением вдох:выдох. Это одна из относительно новых методик. Данную методику применяют при тяжелых поражениях легких, в частности при респираторном дистресс-синдроме взрослых (РДСВ). При котором одновременно существуют участки с резко и умеренно сниженной растяжимостью. В результате во время вдоха происходит выраженное перераспределение вдыхаемого газа: более податливые участки перераздуваются, а там, где активность сурфактанта снижена в наибольшей степени, альвеолы стремятся к спадению.

Задачей ИВЛ при РДСВ является обеспечение адекватного газообмена в условиях множественного спадения альвеол, что в ряде случаев можно достичь с помощью повышенного  $P_{\text{пик}}$  и высокого положительным давлением в конце выдоха (ПДКВ). Однако при увеличении  $P_{\text{пик}}$  (выше 40-50 мм вод.ст.) возрастает риск баротравмы и развития морфологических изменений в легких и дыхательных путях.

Улучшить распределение газа в легких можно путем удлинения фазы вдоха в пределах дыхательного цикла, т.е. увеличив отношение вдох:выдох до 4:1. длительный вдох позволяет снизить разницу между  $P_{\text{пик}}$  и альвеолярным давлением. Раскрытие спавшихся альвеол и их вентиляция достигается во время вдоха, а выдох продолжается столь короткое время, что давление в альвеолах не успевает снизиться до нуля и они не коллабируются. При применении этой методики легкие могут оставаться расправленными и вентилироваться при амплитуде давления, меньшей, чем при обычном отношении вдох:выдох, что уменьшает амплитуду движения самих легких (рис. 6).

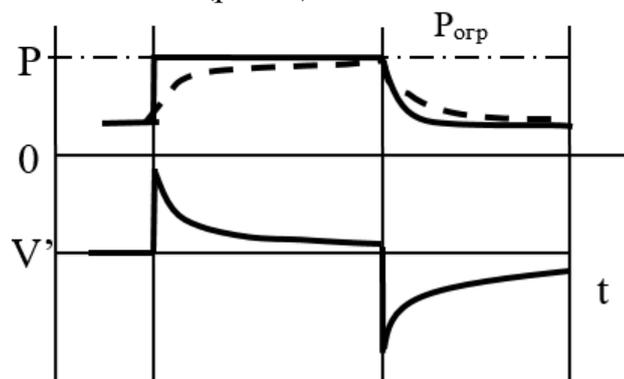


Рис. 6 – Режим ИВЛ с управляемым давлением

Высокочастотная ИВЛ. К высокочастотной искусственной вентиляции легких (ВЧ ИВЛ) относят разные методы, общая особенность которых состоит в использовании высокой частоты вентиляции и уменьшенного дыхательного объема. ИВЛ можно считать высокочастотной, если частота вентиляции превышает



60 дыхательных циклов в минуту (1 Гц). Диапазон частоты дыхательных циклов ВЧ ИВЛ довольно широк – от 60 до 7200 циклов в минуту (1-120 Гц).

В настоящее время большинство исследователей различают три основных метода ВЧ ИВЛ, каждый из которых имеет ряд модификаций: объемная вентиляция легких, обозначаемая иногда как ВЧ ИВЛ под положительным давлением; осцилляторная высокочастотная вентиляция легких; струйная ВЧ ИВЛ.

Высокочастотная объемная ВЧ ИВЛ. Одним из первых методов ВЧ ИВЛ была высокочастотная вентиляция легких под положительным давлением, контролируемая по объему. С этой целью были созданы специальные аппараты. Традиционные респираторы в принципе могут работать в режимах с повышенной частотой, однако значительный снижаемый объем приводит к тому, что большая часть дыхательного объема затрачивается на повышение давления во внутреннем контуре аппарата и не поступает в дыхательные пути больного. При увеличении частоты до 60 циклов в минуту и более, потери дыхательного объема увеличиваются с 11% (при традиционной частоте вентиляции) до более чем 50%, что делает проблематичным обеспечение адекватной вентиляции легких.

Преимущества ВЧ ИВЛ, осуществляемой объемным способом, по сравнению с традиционной ИВЛ оказались незначительными, и в настоящее время метод вытеснен струйной ВЧ ИВЛ.

Осцилляторная ВЧ ИВЛ. Данный метод получил распространение в качестве апноэтического «диффузионного» дыхания. Для проведения ВЧО используются различные устройства. Наибольшее распространение получила модификация, в которой высокочастотные осцилляции, генерируемые поршневым насосом, накладываются на постоянный поток газа.

В клинике ВЧО применяют эпизодически, в основном у новорожденных с респираторным дистресс-синдромом. Попытки применить ВЧО по жизненным показателям у пяти взрослых больных с тяжелым респираторным дистресс-синдромом оказались неудачными.

Перспективы применения осцилляторной ВЧ ИВЛ в клинике как самостоятельного метода ИВЛ весьма проблематичны.

Струйная ВЧ ИВЛ. При струйной ВЧ ИВЛ регулируются три параметра: частота вентиляции, рабочее давление (давление, подаваемое в шланг пациента), и отношение вдох:выдох.

Существует два основных способа струйной ВЧ ИВЛ: инъекционный и чрескатетерный.

В основу инъекционного способа ВЧ ИВЛ положен принцип струйной вентиляции легких, широко применяемый при бронхоскопии, а также в экстренных ситуациях при острой обструкции гортани. При этом струя кислорода, подаваемая под давлением 1-4 кгс/см<sup>2</sup> через инъекционную канюлю, создает вокруг последней разрежение, вследствие чего и происходит подсос атмосферного воздуха – инъекционный эффект Вентури.

При инъекционной ВЧ ИВЛ инжектор с помощью стандартных коннекторов соединяется с эндотрахеальной или трахеостомической трубкой. Через дополнительный патрубок инжектора, свободно открывающийся в атмосферу, осуществляется подсос атмосферного воздуха и сброс выдыхаемого газа (рис. 7).



таким образом, струйная ВЧ ИВЛ реализуется при негерметичном дыхательном контуре.

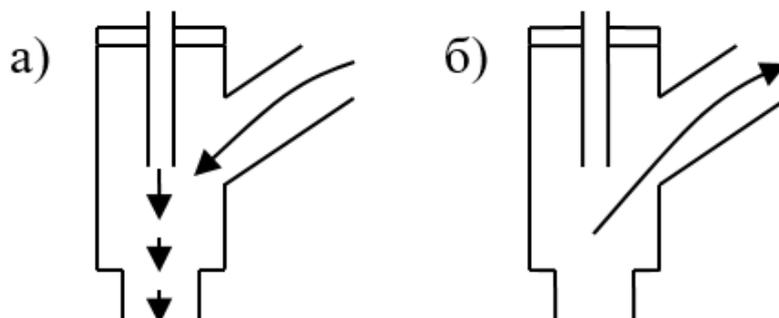


Рис. 7 – Схема устройства инжектора. а – фаза вдоха, б – фаза выдоха

Способ чрескатетерной ВЧ ИВЛ основан на введении тонкого катетера (внутренний диаметр 1-2 мм) в трахею путем пункции – так называемая чрескожная транстрахеальная струйная ВЧ ИВЛ. Реже катетер вводится через носовой ход.

Применяются также другие варианты, в частности введение катетера в интубационную трубку или непосредственно в бронхи при операциях на магистральных дыхательных путях или осуществление вентиляции через узкий канал специально сконструированной двухпросветной интубационной трубки.

Важной и сложной задачей является увлажнение и обогрев вдуваемого газа в условиях струйной ВЧ ИВЛ. Это связано с тем, что выходя из канюли инжектора или катетера, струя кислорода резко расширяется, в следствии чего значительно снижается температура газа и уменьшается его относительная влажность.

Один из способов кондиционирования вдыхаемого газа – обогревание и увлажнение подсасываемого воздуха при инъекционной ВЧ ИВЛ. Для этого к боковому патрубку инжектора подается теплый пар или аэрозоль из парового ингалятора. Это позволяет повысить температуру вдыхаемого газа до 30 °С при 100% относительной влажности, а при использовании повышенной мощности нагревательного элемента – до 35-37 °С.

В настоящее время наилучшим методом считается согревание и увлажнение сжатого газа на его пути из респиратора в канюлю инжектора или катетер. Сжатый кислород обогревается электрическим нагревателем, проложенным внутри шланга высокого давления на всем его протяжении. Температура измеряется в инжекторе и поддерживается на заданном уровне автоматически. Увлажнение обеспечивается постоянной регулируемой инфузией в тот же шланг воды или изотонического раствора хлорида натрия.

При чрескатетерной ВЧ ИВЛ рекомендуется проводить дополнительное увлажнение вдыхаемого воздуха, поступающего через естественные дыхательные пути.

Для объяснения возможности обеспечения адекватного газообмена при ВЧ ИВЛ с  $VT$  меньше, чем  $VD$ , был предложен ряд гипотез, из которых наибольшее распространение получили объединенные общим понятием «усиленная



диффузия». Основное положение гипотезы об «усиленной диффузии»: при высоко частотной ИВЛ газообмен обеспечивается преимущественно за счет диффузии при существенном снижении роли конвекции. Из этих же представлений следовало, что при увеличении частоты вентиляции эффективность газообмена не должна снижаться. Однако дальнейшие исследования показали, что эффективность элиминации  $CO_2$  зависит в большей степени от величины  $VT$ , чем от частоты вентиляции, что противоречит представлениям об исключительной роли в газообмене «усиленной диффузии».

Предложены и другие гипотезы относительно механизмов транспорта газов при ВЧ ИВЛ.

В основе гипотезы прямой альвеолярной вентиляции лежат несимметричность бронхиального дерева и возможность поступления вдыхаемого воздуха в близко расположенные участки легких даже при малых  $VT$ . Возможно, что именно этот механизм обеспечивает газообмен при легких с дыхательным объемом меньше объема мертвого пространства.

Согласно гипотезе о конвекционной дисперсии, обусловленной изменением профиля скорости потока газа на вдохе и выдохе, при прохождении потока через бифуркации трахеобронхиального дерева с каждым дыхательным циклом часть газа остается в дыхательных путях и обеспечивает более глубокое проникновение вдыхаемого газа в следующем дыхательном цикле, что рассматривается в качестве варианта конвективного механизма транспорта газов.