

<https://doi.org/10.36425/rehab63248>

## Высокочастотная вентиляция легких в лечении острой дыхательной недостаточности

С.А. Перепелица<sup>1,2</sup>, А.Н. Кузовлев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

«Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта», Калининград, Российская Федерация

<sup>2</sup> Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научно-клинический центр реаниматологии и реабилитологии», Москва, Российская Федерация

Потребность в респираторной терапии при острой дыхательной недостаточности может достигать 90% в зависимости от категории отделения реанимации и интенсивной терапии. В настоящее время имеется широкий выбор методов респираторной терапии, включая полностью управляемую вентиляцию легких, а также вспомогательные методы. Широкое применение искусственной вентиляции легких и ее разновидностей позволило значительно снизить летальность пациентов в отделении реанимации и интенсивной терапии. Однако смертность новорожденных с дыхательными расстройствами и пациентов с острым респираторным дистресс-синдромом и нозокомиальными пневмониями остается по-прежнему высокой. Высокочастотная искусственная вентиляция легких (ИВЛ) является альтернативным методом лечения тяжелой дыхательной недостаточности, тем не менее в практической деятельности применяется редко. Разработаны три основных вида высокочастотной ИВЛ — с положительным давлением (high-frequency positive pressure ventilation, HFPPV), струйная (high-frequency jet ventilation, HFJV) и осцилляторная (high-frequency oscillatory ventilation, HFOV), благодаря чему врач имеет возможность выбрать определенный режим, который наиболее подходит для конкретного пациента. Применение метода HFOV позволяет успешно проводить лечение новорожденных с тяжелой острой дыхательной недостаточностью, обусловленной первичным дефицитом сурфактанта, мекониевой аспирацией, полиорганной недостаточностью. В последние годы появились публикации о возможности проведения неинвазивной высокочастотной ИВЛ как у взрослых пациентов, так и в детской практике. В статье рассматриваются и обсуждаются возможности высокочастотной ИВЛ в лечении дыхательной недостаточности.

**Ключевые слова:** острая дыхательная недостаточность; искусственная вентиляция легких; высокочастотная искусственная вентиляция легких; острый респираторный дистресс-синдром.

**Для цитирования:** Перепелица С. А., Кузовлев А. Н. Высокочастотная вентиляция легких в лечении острой дыхательной недостаточности. *Физическая и реабилитационная медицина, медицинская реабилитация*. 2021;3(1):63–73. DOI: <https://doi.org/10.36425/rehab63248>

**Поступила:** 10.03.2021 **Принята:** 15.03.2021 **Опубликована:** 04.04.2021

### Список сокращений

ИВЛ — искусственная вентиляция легких  
КТ — компьютерная томография  
ОРДС — острый респираторный дистресс-синдром  
ЭКМО — экстракорпоральная мембранная оксигенация  
FiO<sub>2</sub> (fraction of inspired oxygen) — фракция кислорода во вдыхаемой газовой смеси  
HFJV (high-frequency jet ventilation) — высокочастотная струйная вентиляция  
HFOV (high-frequency oscillatory ventilation) — высокочастотная осцилляторная вентиляция

HFPPV (high-frequency positive pressure ventilation) — высокочастотная вентиляция с положительным давлением  
IPPV (intermittent positive pressure ventilation) — вентиляция с перемежающимся положительным давлением  
PaCO<sub>2</sub> (partial pressure of carbon dioxide) — парциальное давление углекислого газа в артериальной крови  
PaO<sub>2</sub> (partial pressure of oxygen) — парциальное напряжение кислорода в артериальной крови  
PEEP (positive end-expiratory pressure) — положительное давление в конце выдоха  
PLmean (mean transpulmonary pressures) — среднее транспульмональное давление

# High-Frequency Ventilation in the Treatment of Acute Respiratory Failure

S.A. Perepelitsa<sup>1, 2</sup>, A.N. Kuzovlev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russian Federation

<sup>2</sup> Federal Research and Clinical Center of Intensive Care Medicine and Rehabilitology, Moscow, Russian Federation

The need for respiratory therapy can reach 90% depending on the category of the intensive care unit and intensive care unit (ICU). Currently is a wide selection of respiratory therapy methods, including fully controlled mechanical ventilation and assist ventilation. The widespread use of mechanical ventilation and its varieties significantly reduced the mortality of ICU patients. However, the mortality of patients from acute respiratory distress syndrome, nosocomial pneumonia, and newborns with respiratory disorders remains high. High-frequency mechanical ventilation (HFMV) is an alternative treatment for severe respiratory failure, but the frequency of use is not yet sufficient. Three main types of HF ventilation is currently available: high-frequency positive pressure ventilation (HFPPV), high-frequency jet ventilation (HFJV) and high-frequency oscillatory ventilation (HFOV). There is an opportunity to choose a specific mode which will be most applicable for a particular patient. The use of the HFOV method allows the successful treatment of newborns with severe respiratory failure due to primary surfactant deficiency, meconial aspiration or multiple organ failure. Recently high amount of publications appeared on the possibilities of non-invasive HFMV in both adult patients and in pediatrics. This mini-review is devoted to this problem.

**Keywords:** acute respiratory failure; artificial lung ventilation; high-frequency artificial lung ventilation; acute respiratory distress syndrome.

**For citation:** Perepelitsa SA, Kuzovlev AN. High-Frequency Ventilation in the Treatment of Acute Respiratory Failure. *Physical and rehabilitation medicine, medical rehabilitation*. 2021;3(1):63–73. DOI: <https://doi.org/10.36425/rehab63248>

**Received:** 10.03.2021 **Accepted:** 15.03.2021 **Published:** 04.04.2021

## Обоснование

Заболевания дыхательных путей и острая дыхательная недостаточность остаются доминирующими структурами заболеваемости и смертности во всех возрастных группах. По данным Всемирной организации здравоохранения, в 2016 г. от инфекций нижних дыхательных путей в мире умерло 3,0 млн человек, хроническая обструктивная болезнь легких унесла также 3,0 млн жизней. Инфекции нижних дыхательных путей занимают 3-е место среди 10 основных причин смерти в мире и регистрируются во всех странах, независимо от уровня дохода населения. При этом наибольшая смертность регистрируется в странах с низким и ниже среднего уровнем доходов, где ее показатель находится в диапазоне от 75 до 50 случаев соответственно на 100 000 населения [1–3]. Внебольничная пневмония в 6% случаев является основной причиной госпитализации в отделения реаниматологии и интенсивной терапии, при этом смертность в них достигает 35%, а общая внутрибольничная смертность — 50%. В Российской Федерации в 2018 г. заболеваемость пневмонией составляла 35 982 случая на 100 000 населения, а смертность — 41,6 на 100 000 человек [4]. Кроме того,

часто течение заболевания сопровождается развитием сердечно-сосудистой недостаточности, что повышает риск наступления летального исхода [5]. Другими заболеваниями, проявляющимися острой дыхательной недостаточностью, могут быть острый респираторный дистресс-синдром [6–8], политравма [9–11], заболевания центральной нервной системы различной этиологии и локализации [12–14], нозокомиальная пневмония [15–17]. Таким образом, любые заболевания, сопровождающиеся развитием и прогрессированием острой дыхательной недостаточности, нуждаются в проведении респираторной терапии. В настоящее время выбор метода респираторной терапии достаточно широк. В зависимости от тяжести острой дыхательной недостаточности применяют оксигенотерапию через лицевую маску или назальные канюли [18–20], инвазивную [21–23] и традиционную [24–26] искусственную вентиляцию легких (ИВЛ).

Высокочастотная ИВЛ может быть альтернативным методом выбора, когда у пациентов диагностируется глубокая гипоксемия, обусловленная повреждением легких, тяжелыми нарушениями центральной и периферической гемодинамики, а стан-

дартные режимы ИВЛ не всегда обеспечивают устранение гипоксии.

В настоящее время применяют три вида высокочастотной ИВЛ — струйную (high-frequency jet ventilation, HFJV), осцилляторную (high-frequency oscillatory ventilation, HFOV) и с положительным давлением (high-frequency positive pressure ventilation, HFPPV). Все варианты высокочастотной ИВЛ используются в клинической практике. В последние годы этот вид респираторной поддержки начал широко применяться как в лечении пациентов с тяжелой острой дыхательной недостаточностью, так и в анестезиологии для обеспечения эндоскопических операций и инструментальных исследований у пациентов с высоким риском развития гипоксемии.

Рассмотрим возможности применения этих режимов.

### **Высокочастотная струйная вентиляция (HFJV)**

Высокочастотная струйная вентиляция легких является разновидностью ИВЛ и проводится аппаратом с инжектором типа сопла, которое позволяет производить вдувание высокоскоростного потока газовой смеси в дыхательные пути. Метод позволяет проводить ИВЛ с частотой дыхания от 80 до 600 в мин<sup>-1</sup> [27–29]. Во время вдоха инсuffируемая газовая смесь периодически подается инжектором с высокой частотой в открытые дыхательные пути. Выдох у пациента происходит пассивно. В зависимости от методики и показаний струйная вентиляция может быть осуществлена в надглоточном, транстрахеальном пространстве. Частота дыхания, давление в дыхательных путях, концентрация кислорода и время вдоха подбираются в зависимости от показателей газообмена пациента [30]. Метод обеспечивает более низкое давление в дыхательных путях и меньшее движение диафрагмы, органов грудной клетки и брюшной полости, что дает особые преимущества при эндоскопических вмешательствах, хирургии гортани или у пациентов с синдромом утечки воздуха [31]. Развитие осложнений вероятно у пациентов с тяжелыми заболеваниями легких, особенно с рестриктивной патологией. Возможные осложнения: пневмоторакс, пневмомедиастинум, подкожная эмфизема и нарушения газообменной функции легких (развитие гипоксемии и гиперкарбии) [32]. Исходно уменьшенный просвет дыхательных путей является фактором риска развития осложнений [33]. При выборе метода анестезиолог должен учитывать все вероятные риски. Возраст пациента не является ограничением для HFJV. Тяжелая хроническая обструктивная болезнь легких счи-

тается относительным противопоказанием к HFJV из-за потенциального риска баротравмы [34].

### **Возможности применения высокочастотной струйной вентиляции легких в анестезиологии**

Основная задача анестезиолога в эндоскопической хирургии — обеспечение эффективной работы хирурга при поддержании нормального газообмена у пациента. Для успешной работы хирурга необходимо ограничение смещения так называемых целевых органов. Последнее условие является проблемным при проведении обычной ИВЛ для обеспечения операций, требующих точности в работе хирурга, т.к. во время дыхательного цикла происходит постоянное смещение диафрагмы, органов грудной клетки и брюшной полости. Высокочастотная струйная вентиляция является методом выбора при проведении абляции опухолей печени, почек и легких [35, 36]. Этот вариант обеспечивает непрерывную вентиляцию легких небольшим дыхательным объемом с высокой частотой дыхания, значительное ограничение движения диафрагмы и органа-мишени, что позволяет эффективно и быстро проводить необходимое лечение [37]. В нескольких исследованиях сообщалось о снижении технических трудностей, связанных с размещением зонда, временем процедуры и дозой облучения пациента во время вмешательств с визуальным контролем и однозондовой термической абляцией метастатических опухолей в печени и легких [35, 36].

Стереотаксические операции при опухолях печени требуют максимальной точности в выполнении чрескожной абляции локализованного очага, при этом смещение органа должно быть минимальным. K. Galmén и соавт. [38] обеспечивали данную процедуру с помощью интраоперационной HFJV. Во время операции с помощью оптической системы отслеживания движения печени проводился расчет смещения органа при HFJV и объемной вентиляции легких. Результаты исследования показали, что при HFJV среднее смещение печени составляет 0,8 (0,1) мм, при объемной ИВЛ — увеличивается в 3,6 раза. Таким образом, при выполнении чрескожной абляции HFJV имеет большие преимущества перед обычной механической вентиляцией легких [38].

D. Y. Chung и соавт. [35] провели сравнительное исследование чрескожной термической абляции опухоли легкого под контролем компьютерной томографии (КТ). Авторы применили два вида респираторной поддержки — HFJV под общей анестезией и спонтанное дыхание под седацией. У пациентов, которым проводилась HFJV под общей анестези-

ей, продолжительность манипуляции, количество рентгеновских снимков и доза облучения, необходимые для размещения аппликатора, были статистически значимо ниже, чем в группе сравнения [35]. При выполнении манипуляции под седацией на сохраненном дыхании у пациента нельзя ограничить экскурсию диафрагмы и легких, что значительно затрудняет работу врача, увеличивает время, необходимое для «прицеливания» на опухоль. Применение HFJV, с одной стороны, обеспечивает необходимый газообмен, с другой — уменьшает смещение диафрагмы и легких во время дыхания, что позволяет хирургу под контролем КТ быстрее разместить чрескожный аппликатор для абляции опухоли легкого.

В другом проспективном исследовании с участием 51 пациента показаны преимущества проведения абляции опухолей печени, почек и легких при использовании в качестве метода респираторной терапии HFJV. Средний размер опухоли составлял  $16 \pm 8,7$  мм. Методика HFJV была использована у 41 из 51 пациента [36].

Применение HFJV во время криоабляции почки под контролем КТ уменьшает движение опухоли-мишени, что способствует снижению технических трудностей при введении зонда, сокращению времени процедуры и тем самым дозы облучения. HFJV является важным методом обеспечения сложных вмешательств с визуальным контролем, которые могут улучшить безопасность, улучшить результаты лечения [39].

HFJV — метод выбора для обеспечения вентиляции во время фиброоптической и жесткой бронхоскопии. Жесткая бронхоскопия применяется в интервенционной пульмонологии для установки стентов, трансбронхиальной криобиопсии, в связи с чем возникает необходимость анестезиологического обеспечения этих процедур [29]. Большинство таких пациентов имеют проблемы с дыханием, в частности исходную гипоксемию, гиперкарбию различной степени, поэтому подбор метода обеспечения дыхания во время процедуры является актуальным. В исследование А. Abedini и соавт. [40] включено 16 пациентов с исходной выраженной гипоксемией, показатель насыщения кислорода до процедуры не превышал 70%, среднее давление насыщения кислородом 54,8 мм рт. ст. Во время бронхоскопии вентиляцию осуществляли через рабочий канал бронхоскопа. Длительность HFJV составляла 3 мин. Через 30 с от начала вентиляции у всех пациентов показатель насыщения кислородом достиг 90% и более, среднее давление насыщения кислородом увеличилось до 112 мм рт. ст. В исследовании показана оптимальность метода HFJV

для проведения бронхоскопии, а именно эффективность самой манипуляции и оксигенации у пациентов с исходной гипоксемией [40].

Эндоваскулярная эмболизация является методом выбора при лечении легочных артериовенозных мальформаций. Эмболизация обычно проводится под местной анестезией и седацией. Для выполнения процедуры разработаны многочисленные устройства, которые должны обеспечивать безопасную окклюзию сосудов [41]. Однако эти методы не позволяют уменьшить амплитуду дыхания, что приводит к постоянному смещению мишени, препятствуя созданию двух- и трехмерной математической модели; ограничивает точную навигацию, значительно увеличивая время манипуляции, количество ангиографических снимков и дозу облучения. По этим причинам предпочтение отдается общей анестезии с проведением прерывистой вентиляции с положительным давлением (intermittent positive pressure ventilation, IPPV). Альтернативным методом может быть HFJV, во время которой используют минимальный дыхательный объем (1–3 мл/кг) и высокую частоту дыхательных циклов ( $>100$  циклов/мин), что в значительной степени минимизирует экскурсии грудной клетки и брюшной полости в сравнении с IPPV [42]. Проведенное исследование показало, что у пациентов, перенесших эмболизацию легочных артериовенозных мальформаций с помощью HFJV, является безопасной методикой, позволяющей улучшить результаты лечения, сократить время выполнения манипуляции, а также снизить дозу облучения пациента [43].

### Высокочастотная осцилляторная вентиляция (HFOV)

Первичное или вторичное повреждение легких приводит к острой дыхательной недостаточности и развитию гипоксемии различной степени тяжести. В большинстве случаев вызванные причины приводят к развитию острого респираторного дистресс-синдрома (ОРДС), тяжесть которого определяется выраженностью гипоксемии [44]. При легкой форме ОРДС предпочтительна неинвазивная ИВЛ. При тяжелой ОРДС индекс оксигенации ( $\text{PaO}_2/\text{FiO}_2$ ) снижается менее 100 мм рт. ст. и характеризуется развитием рефрактерной гипоксемии. В этих случаях неинвазивная респираторная терапия в большинстве случаев неэффективна, в связи с чем пациенты нуждаются в инвазивной ИВЛ. Однако улучшение оксигенации может быть достигнуто только применением жестких параметров вентиляции, что значительно повышает риск вентиляторассоциированного повреждения легких [45–48].

Новые подходы к лечению пациентов с ОДРС являются приоритетной задачей. Основная цель респираторной терапии — безопасная вентиляция с максимально быстрым восстановлением газообмена в легких [49]. Поиски этого метода продолжаются.

Множество научных публикаций посвящено высокочастотной, в том числе осцилляторной вентиляции легких. Теоретической основой метода является обеспечение газообмена в легких с использованием низких дыхательных объемов и высокой частоты дыхания. Эти свойства HFOV потенциально делают его альтернативным методом респираторной терапии в лечении рефрактерной гипоксемии у пациентов с ОРДС, что будет способствовать восстановлению оксигенации и снижать риск вентиляторассоциированного повреждения легких [50].

В эксперименте на животных моделях (свиньи) показано, что при выборе параметров HFOV необходимо учитывать транспульмональное давление. Исходно группы не различались по уровню оксигенации или внесосудистому индексу воды в легких. Эксперимент показал, что сердечный выброс, ударный объем, среднее артериальное давление и индекс внутригрудного объема крови были значительно выше во время проведения HFOV с учетом среднего транспульмонального давления (PLmean), чем при той же технологии, не учитывающей PLmean. Установлено, что HFOV PLmean ассоциируется с меньшими нарушениями гемодинамики и меньшим положительным давлением в конце выдоха (positive end-expiratory pressure, РЕЕР), чем HFOV без учета PLmean. Оксигенация улучшилась при использовании обоих режимов. Однако индивидуальный подход к выбору параметров HFOV с учетом транспульмонального давления может быть полезным при выборе респираторной терапии у пациентов с ОРДС. Обеспечение альвеолярной стабилизации с помощью HFOV без чрезмерного расширения легких может быть ключевым в контексте предупреждения вентиляторассоциированного повреждения легких [51].

В клинической практике отношение к HFOV неоднозначное. Так, в многоцентровом исследовании показано, что у пациентов, перенесших ИВЛ при ОРДС, использование HFOV не оказало существенного влияния на 30-дневную смертность [52]. В ходе другого исследования продемонстрировано, что большее число пациентов в группе HFOV, чем в контрольной группе (ИВЛ), получали вазоактивные препараты и длительность их применения так же была выше. Седативные средства и опиоиды (чаще всего мидазолам и фентанил) назначались с одинаковой продолжительностью в обеих группах,

но в течение первой недели средние дозы мидазолама были значительно выше в группе HFOV, чем в контроле. Аналогичная ситуация прослеживалась с назначением фентанила. Частота использования других препаратов и методик, включающих глюкокортикоиды, заместительную почечную терапию и прон-позицию, была одинаковой в обеих группах. Рефрактерная гипоксемия развилась у значительно большего числа пациентов в контрольной группе, чем при HFOV, но смертность после рефрактерной гипоксемии было одинаковой. Среди выживших пациентов продолжительность вентиляции и длительность лечения в отделении интенсивной терапии не имели отличий между группами. Основным выводом этого многоцентрового рандомизированного исследования является то, что среди пациентов с ОРДС средней и тяжелой степени раннее применение HFOV было связано с более высокой смертностью, чем при использовании стратегии вентиляции с использованием небольших дыхательных объемов и высоких уровней РЕЕР. Таким образом, применение методики HFOV нецелесообразно у взрослых с ОРДС средней и тяжелой степени [53].

J. L. Vincent [54] считает, что HFOV является концептуально привлекательным методом ИВЛ для пациентов с ОРДС. При данном виде респираторной терапии газообмен поддерживается с помощью следующих параметров: небольшой дыхательный объем, повышенное внутригрудное давление и пониженный альвеолярный коллапс [54]. Тем не менее автор ссылается на проведенные многоцентровые исследования с результатами негативного влияния HFOV на исходы, в частности в отсутствии разницы в 30-дневной смертности [55, 56]. Эти результаты ставят под сомнение широкое применение метода в лечении ОРДС. Необходимо новое планирование широких рандомизированных исследований [54].

М. С. Sklar и соавт. [50] предполагают, что в ближайшее время метод HFOV, возможно, будет более безопасным и эффективным при тщательном подходе к его назначению, определению среднего давления в дыхательных путях и эхокардиографическом мониторинге внутрисердечной гемодинамики [50, 57].

Несмотря на относительно недавние публикации по этой теме, в них представлены результаты многоцентровых исследований 15–20-летней давности. В настоящее время стратегии проведения ИВЛ претерпели значительные изменения, поэтому, вероятно, могут появиться новые результаты применения высокочастотной вентиляции при рефрактерной гипоксемии.

Лечебная тактика при рефрактерной гипоксемии может включать различные режимы ИВЛ, прон-

позицию [58–60], нейромышечную блокаду [61], рекрутмент-маневр [62], ингаляционные легочные вазодилататоры [12] и экстракорпоральную мембранную оксигенацию (ЭКМО) [63].

### Высоочастотная вентиляция с положительным давлением (HFPPV)

HFPPV осуществляется с помощью пневматического, ограниченного по давлению высокочастотного прерывателя потока с циклическим воздействием времени и обеспечивает небольшие дыхательные объемы с частотой 300–700 колебаний в мин<sup>-1</sup> [27, 29, 64]. Эффект HFPPV обеспечивается ламинарным потоком газовой смеси, который на вдохе способствует более эффективной доставке кислорода к альвеолам, а на выдохе значительно улучшает элиминацию углекислого газа [64]. Преимуществом HFPPV является достижение более высоких уровней оксигенации при низких пиковом и среднем давлении в дыхательных путях, что способствует профилактике повреждения легких [65, 66]. В отличие от HFOV, при проведении HFPPV происходит ступенчатая подача инсуффлируемой газовой смеси в легкие с учетом их физиологических параметров — податливости легких и сопротивления дыхательных путей [67].

T. Godet и соавт. [68] в эксперименте показали, что проведение HFPPV в ранней стадии ОРДС значительно улучшает оксигенацию. Положительными эффектами HFPPV являются улучшение рекрутирования альвеол и аэрации легких, оксигенации артериальной стенки, уменьшение шунтирования крови, повышение вазоконстрикции периферических артерий. Во время проведения HFPPV у экспериментальных животных гемодинамика была стабильной. Артериальное давление не снижалось и не вызывало серьезных неблагоприятных гемодинамических сдвигов. Авторы делают вывод, что HFPPV может быть использован в качестве альтернативной респираторной терапии у пациентов в ранней стадии ОРДС, когда с помощью ИВЛ невозможно улучшить оксигенацию и аэрацию легких [68].

Ретроспективный анализ проведения HFPPV у 42 пациентов с ОРДС (20 случаев, вызванных пневмонией, и 22 случая, не связанных с пневмонией) различной степени тяжести показал, что в течение 24-часового HFPPV оксигенация улучшилась, а парциальное давление углекислого газа в артериальной крови (PaCO<sub>2</sub>) нормализовалось. В течение всего времени HFPPV не наблюдалось ни значительных гемодинамических изменений, ни баротравмы. Достигнутый респираторный и гемодинамический эффект был стабильным. При ОРДС, обусловленном те-

чением пневмонии, нормализация оксигенации была более медленной. В этой группе отмечались длительная вентиляция и время лечения в отделении реанимации, а также более высокая 30-дневная смертность (50 против 18%;  $p=0,01$ ). Основная причина летальных исходов — рефрактерная полиорганная недостаточность. В исследовании выделены негативные стороны HFPPV, а именно влияние на протоколы седации (например, седация низкого уровня, перерывы седации). Позиционирование пациентов требует круглосуточного наблюдения специальной группой врачей и респираторных терапевтов. Несмотря на полученные положительные эффекты HFPPV, авторы не поддерживают применение этого вида вентиляции для пациентов с ОРДС [69].

Лечение глубокой рефрактерной гипоксемии является сложной клинической задачей. В большинстве случаев на современном этапе альтернативным методом считается ЭКМО. Длительность процедуры может быть различной и зависит от тяжести гипоксемии. После ЭКМО обязательно проводится ИВЛ. Выбор режима вентиляции также является предметом дискуссий и научных исследований. В работах A. J. Michaels и соавт. [70] и A. Boscolo и соавт. [71] в качестве режима вентиляции легких предлагается проведение HFPPV. A. J. Michaels и соавт. [70] проводили лечение 39 пациентов с тяжелым ОРДС и рефрактерной гипоксемией, что явилось показанием для ЭКМО. До начала процедуры ЭКМО пациентам в течение 3 сут проводили ИВЛ. Средний индекс оксигенации (PaO<sub>2</sub>/FiO<sub>2</sub>) составлял 52,3±3,0, а PaCO<sub>2</sub> — 50,2±2,4 мм рт. ст. Медиана продолжительности ЭКМО составляла 106 ч [45,75–350,25]. Затем было принято решение о проведении HFPPV, длительность которой составляла 143,1±17,6 ч. После ЭКМО и HFPPV средний индекс оксигенации составлял 301,8±16,7. Применение методов привело к восстановлению газообменной функции легких [70].

A. Boscolo и соавт. [71] представили клинический случай успешного лечения пациентки с ОРДС, септическим шоком на фоне течения внебольничной пневмонии. В течение 19 дней женщине проводили ЭКМО. Затем с целью облегчить деканюляцию и провести отлучение от ЭКМО пациентке проводили HFPPV с использованием объемного диффузного дыхательного вентилятора VDR-4 (Percussionaire Corp, Sandpoint, Айдахо, США). В результате лечения нормализовались газообмен и клиренс легочной секреции, рентгенограмма легких улучшилась. Авторы делают вывод, что HFPPV может быть стратегией выбора для улучшения рекрутирования легких во время отлучения от ЭКМО у критически больного пациента [71].

HFPPV может быть альтернативой выбора у пациентов после кардиохирургических вмешательств. В исследовании I. Wong и соавт. [72] представлены результаты лечения 16 пациентов, которым потребовалось проведение ИВЛ после операции на сердце и магистральных сосудах. В связи с развитием рефрактерной гипоксемии, резистентной к традиционной вентиляции легких, было принято решение о проведении HFPPV. Через 24 ч от ее начала отмечалось улучшение оксигенации,  $\text{PaO}_2$  увеличилось с 61 до 149,5 мм рт. ст. ( $p < 0,001$ ), повысился индекс оксигенации. Выживаемость до выписки составила 81%. Авторами представлен успешный опыт применения HFPPV у кардиохирургических пациентов, и в этом случае он является альтернативным методом, устраняющим необходимость ЭКМО [72].

Пациенты с патологическим ожирением и дыхательной недостаточностью представляют еще одну сложную задачу в клинической практике. Проведение обычной ИВЛ часто не приводит к улучшению оксигенации и способствует развитию рефрактерной гипоксемии. В этом случае одним из немногочисленных эффективных методов лечения является ЭКМО. Однако А. Korzhuk и соавт. [73] применили у пациентов с патологическим ожирением ( $n=12$ ) альтернативный метод вентиляции — HFPPV. Причиной дыхательной недостаточности являлись кардиогенный отек легких ( $n=8$ ), пневмония ( $n=5$ ), септический шок ( $n=5$ ) и астма ( $n=1$ ). До начала HFPPV среднее значение  $\text{FiO}_2$  составляло 98%,  $\text{PaO}_2$  — 60,9 мм рт. ст. Проведение HFPPV привело к улучшению показателей: спустя 2 ч вентиляции в этом режиме среднее значение  $\text{FiO}_2$  составляло 82%, среднее значение  $\text{PaO}_2$  увеличилось до 175,1 мм рт. ст. и поддерживалось на уровне 129,5 мм рт. ст. Через 24 ч лечения среднее значение  $\text{FiO}_2$  снизилось до 66%, а  $\text{PaO}_2$  поддерживалось на уровне 88,1 мм рт. ст., достигнутые результаты были устойчивыми. Через 24 ч у 10 пациентов в связи с достижением положительного эффекта режим HFPPV изменен на обычную ИВЛ, у 2 — продолжалась HFPPV. Выживаемость до выписки составила 66,7%. В исследовании показано, что у пациентов с патологическим ожирением HFPPV был успешно использован в качестве терапии, исключающей необходимость ЭКМО [73].

В одноцентровом ретроспективном исследовании продемонстрирована эффективность HFPPV с низким  $\text{FiO}_2$  (25%) у пациентов с ожоговой болезнью, находящихся на ИВЛ более 10 дней. В исследование включены пациенты с обширными ожогами, в том числе дыхательных путей. Большинство больных имели значимые сопутствующие заболевания

(пневмония у 50%), умерли 28%. Выбор респираторной стратегии был эффективен, т. к. не было случаев развития ОРДС, баротравмы. Проведение HFPPV с низким  $\text{FiO}_2$  является безопасным и эффективным способом вентиляции пациентов с тяжелыми ожогами. Снижение окислительного стресса при высоких уровнях кислорода может улучшить исход [74].

Рефрактерный астматический статус характеризуется развитием тяжелого бронхоспазма, глубокой гипоксемии, что требует ИВЛ для обеспечения оксигенации и вентиляции до разрешения бронхоспазма, но именно в этих случаях ИВЛ сопряжена с высоким риском осложнений. До настоящего времени идут поиски максимально эффективной и безопасной терапии лечения рефрактерного астматического статуса. Терапия включает применение миорелаксантов, гелия [75], общую анестезию севофлураном [76], ЭКМО [77–79]. Выбор режима ИВЛ остается дискутируемым вопросом. Описан клинический случай применения у пациентки с рефрактерным астматическим статусом комбинированного лечения, включающего HFPPV, непрерывную ингаляцию Альбутерола и нервно-мышечную блокаду. До начала лечения показатели кислотно-основного состояния крови были неудовлетворительными, pH 6,97, что и стало причиной назначения комплексной терапии. Через 10 ч от начала HFPPV показатели газового состава и кислотно-основного состояния крови нормализовались [80].

### Заключение

Высокочастотная вентиляция легких является методом выбора врача в обеспечении респираторной поддержки у пациентов различного профиля. Струйная высокочастотная вентиляция легких достаточно широко используется в интервенционной медицине. Ее применение показало высокую эффективность в поддержании необходимого газообмена пациента, обеспечении комфортной работы хирурга, что в совокупности дает хороший лечебный результат. Актуальным остается вопрос выбора режима вентиляции легких при рефрактерной гипоксемии. Имеется двойственное мнение о применении высокочастотной осцилляторной вентиляции для лечения пациентов с ОРДС тяжелой степени. Научные данные о высокочастотной вентиляции с положительным давлением также неоднозначны. Применение метода в отдельных случаях или в небольшой группе пациентов с дыхательной недостаточностью дают положительные результаты, что требует проведения многоцентровых исследований. Выбор метода респираторной терапии является прерогативой врача, планирующего технологию операции. Главная цель — выбор оптимально-

го режима вентиляции легких при отсутствии неблагоприятного влияния на легкие.

### Источник финансирования

Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

### Funding source

This study was not supported by any external sources of funding.

### Конфликт интересов

Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

### Competing interests

The authors declare that they have no competing interests.

### Вклад авторов

**С. А. Перепелица** — обсуждение темы обзора, поиск современных источников литературы, плани-

рование публикации, написание статьи; **Н. Кузовлев** — обсуждение темы обзора, перевод зарубежных источников литературы, аннотации, составление списка литературы, правка текста.

Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

### Author contribution

**S. A. Perepelitsa** — discussion of the review topic, search for modern literature sources, publication planning, article writing; **A. N. Kuzovlev** — discussion of the review topic, translation of foreign literature sources, annotations, compilation of a list of references, text editing.

All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

### Список литературы / References

1. World Health Organization. The top 10 causes of death [accessed 2018 Sept 1]. Available from: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs310/en/>
2. GBD 2016 Lower Respiratory Infections Collaborators. Estimates of the global, regional, and national morbidity, mortality, and aetiologies of lower respiratory infections in 195 countries, 1990–2016: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2016. *Lancet Infect Dis.* 2018;18(11):1191–1210. doi: 10.1016/S1473-3099(18)30310-4
3. Corrêa RA, José BP, Malta DC, et al. Burden of disease by lower respiratory tract infections in Brazil, 1990 to 2015: estimates of the Global Burden of Disease 2015 study. *Rev Bras Epidemiol.* 2017;20(Suppl 1):171–181. doi: 10.1590/1980-5497201700050014
4. Здравоохранение в России. 2019: Стат. сб. / Росстат. Москва, 2019. 170 с. [Healthcare in Russia. Moscow; 2019. 170 p. (In Russ).]
5. Prina E, Ranzani OT, Torres A. Community-acquired pneumonia. *Lancet.* 2015;38(9998):1097–1108. doi: 10.1016/S0140-6736(15)60733-4
6. Yadav H, Thompson BT, Gajic O. Fifty years of research in ARDS. Is acute respiratory distress syndrome a preventable disease? *Am J Respir Crit Care Med.* 2017;195(6):725–736. doi: 10.1164/rccm.201609-1767CI
7. Dembinski R, Mielck F. [ARDS — an update — Part 1: Epidemiology, pathophysiology and diagnosis. (In German)]. *Anesthesiol Intensivmed Notfallmed Schmerzther.* 2018; 53(2):102–111. doi: 10.1055/s-0043-107166
8. Peck TJ, Hibbert KA. Recent advances in the understanding and management of ARDS. *F1000Res.* 2019;8:F1000. doi: 10.12688/f1000research.20411.1
9. Kovacs G, Sowers N. Airway management in trauma. *Emerg Med Clin North Am.* 2018;36(1):61–84. doi: 10.1016/j.emc.2017.08.006
10. El Mestoui Z, Jalalzadeh H, Giannakopoulos GF, et al. Incidence and etiology of mortality in polytrauma patients in a Dutch level I trauma center. *Eur J Emerg Med.* 2017; 24(1):49–54. doi: 10.1097/MEJ.0000000000000293
11. Tarng YW, Liu YY, Huang FD, et al. The surgical stabilization of multiple rib fractures using titanium elastic nail in blunt chest trauma with acute respiratory failure. *Surg Endosc.* 2016;30(1):388–395. doi: 10.1007/s00464-015-4207-9
12. Hind CR. Neurogenic respiratory failure. *Handb Clin Neurol.* 2013;110:295–302. doi: 10.1016/B978-0-444-52901-5.00024-1
13. Falsaperla R, Elli M, Pavone P, et al. Noninvasive ventilation for acute respiratory distress in children with central nervous system disorders. *Respir Med.* 2013;107(9): 1370–1375. doi: 10.1016/j.rmed.2013.07.005
14. Erdoğan S, Yakut K, Kalın S. Acute encephalitis and myocarditis associated with respiratory syncytial virus infections. *Turk J Anaesthesiol Reanim.* 2019;47(4):348–351. doi: 10.5152/TJAR.2019.52028

15. Cassini A, Plachouras D, Eckmanns T, et al. Burden of six healthcare-associated infections on European population health: estimating incidence-based disability-adjusted life years through a population prevalence-based modelling study. *PLoS Med.* 2016;13(10):e1002150. doi: 10.1371/journal.pmed.1002150
16. Arefian H, Vogel M, Kwetkat A, et al. Economic evaluation of interventions for prevention of hospital acquired infections: a systematic review. *PLoS One.* 2016; 11(1):e0146381. doi: 10.1371/journal.pone.0146381
17. Walter J, Haller S, Quinten C, et al. Healthcare-associated pneumonia in acute care hospitals in European Union / European Economic Area countries: an analysis of data from a point prevalence survey, 2011 to 2012. *Euro Surveill.* 2018;23(32):1700843. doi: 10.2807/1560-7917.ES.2018.23.32.1700843
18. Pillai A, Daga V, Lewis J, et al. High-flow humidified nasal oxygenation vs. standard face mask oxygenation. *Anaesthesia.* 2016;71(11):1280–1283. doi: 10.1111/anae.13607
19. Huang HW, Sun XM, Shi ZH, et al. Effect of high-flow nasal cannula oxygen therapy versus conventional oxygen therapy and noninvasive ventilation on reintubation rate in adult patients after extubation: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *J Intensive Care Med.* 2018;33(11):609–623. doi: 10.1177/0885066617705118
20. Pickard K, Harris S. High flow nasal oxygen therapy. *Br J Hosp Med (Lond).* 2018;79(1):C13–C15. doi: 10.12968/hmed.2018.79.1.C13
21. Bourke SC, Piraino T, Pisani L, et al. Beyond the guidelines for non-invasive ventilation in acute respiratory failure: implications for practice. *Lancet Respir Med.* 2018; 6(12):935–947. doi: 10.1016/S2213-2600(18)30388-6
22. Nicolini A, Ferrando M, Solidoro P, et al. Non-invasive ventilation in acute respiratory failure of patients with obesity hypoventilation syndrome. *Minerva Med.* 2018;109(6 Suppl 1):1–5. doi: 10.23736/S0026-4806.18.05921-9
23. Morley SL. Non-invasive ventilation in paediatric critical care. *Paediatr Respir Rev.* 2016;20:24–31. doi: 10.1016/j.prrv.2016.03.001
24. Singer BD, Corbridge TC. Basic invasive mechanical ventilation. *South Med J.* 2009;102(12):1238–1245. doi: 10.1097/SMJ.0b013e3181bfac4f
25. Jaber S, Bellani G, Blanch L, et al. The intensive care medicine research agenda for airways, invasive and noninvasive mechanical ventilation. *Intensive Care Med.* 2017;43(9):1352–1365. doi: 10.1007/s00134-017-4896-8
26. Walter JM, Corbridge TC, Singer BD. Invasive mechanical ventilation. *South Med J.* 2018;111(12):746–753. doi: 10.14423/SMJ.0000000000000905
27. Терек П., Калиг К. Теоретические основы высокочастотной вентиляции. Екатеринбург: АМБ, 2005. 192 с. [Terek P, Kaliq K. Theoretical foundations of high-frequency ventilation. Yekaterinburg: AMB; 2005. 192 p. (In Russ).]
28. Любименко В.А., Мостовой А.В., Иванов С.Л. Высоочастотная искусственная вентиляция легких в неонатологии. Москва, 2002. 126 с. [Lyubimenko VA, Mostovoy AV, Ivanov SL. High-frequency artificial ventilation lung diseases in neonatology. Moscow; 2002. 126 p. (In Russ).]
29. Putz L, Mayné A, Dincq AS. Jet ventilation during rigid bronchoscopy in adults: a focused review. *Biomed Res Int.* 2016;2016:4234861. doi: 10.1155/2016/4234861
30. Fritzsche K, Osmers A. [Anesthetic management in laryngotracheal surgery. High-frequency jet ventilation as strategy for ventilation during general anesthesia. (In German)]. *Anaesthesist.* 2010;59(11):1051–1061; quiz 1062–3. doi: 10.1007/s00101-010-1815-6
31. Klain M, Keszler H. High-frequency jet ventilation. *Surg Clin North Am.* 1985;65(4):917–930. doi: 10.1016/s0039-6109(16)43687-x
32. Evans E, Biro P, Bedforth N. Jet ventilation. *Continuing Education in Anaesthesia Critical Care & Pain.* 2007;7(1): 2–5. doi: 10.1093/bjaceaccp/mkl061
33. Goudra BG, Singh PM, Borle A, et al. Anesthesia for advanced bronchoscopic procedures: state-of-the-art review. *Lung.* 2015;193(4):453–465. doi: 10.1007/s00408-015-9733-7
34. Buchan T, Walkden M, Jenkins K, et al. High-frequency jet ventilation during cryoablation of small renal tumours. *Cardiovasc Intervent Radiol.* 2018;41(7):1067–1073. doi: 10.1007/s00270-018-1921-4
35. Chung DY, Tse DM, Boardman P, et al. High-frequency jet ventilation under general anesthesia facilitates CT-guided lung tumor thermal ablation compared with normal respiration under conscious analgesic sedation. *J Vasc Interv Radiol.* 2014;25(9):1463–1469. doi: 10.1016/j.jvir.2014.02.026
36. Denys A, Lachenal Y, Duran R, et al. Use of high-frequency jet ventilation for percutaneous tumor ablation. *Cardiovasc Intervent Radiol.* 2014;37(1):140–146. doi: 10.1007/s00270-013-0620-4
37. Raiten J, Elkassabany N, Mandel JE. The use of high-frequency jet ventilation for out of operating room anesthesia. *Curr Opin Anaesthesiol.* 2012;25(4):482–485. doi: 10.1097/ACO.0b013e3283554375
38. Galmén K, Freedman J, Toporek G, et al. Clinical application of high frequency jet ventilation in stereotactic liver ablations – a methodological study. *F1000Res.* 2018; 7:773. doi: 10.12688/f1000research.14873.2
39. Abderhalden S, Biro P, Hechelhammer L, et al. CT-guided navigation of percutaneous hepatic and renal radiofrequency ablation under high-frequency jet ventilation: feasibility study. *J Vasc Interv Radiol.* 2011;22(9): 1275–1278. doi: 10.1016/j.jvir.2011.04.013
40. Abedini A, Kiani A, Taghavi K, et al. High-Frequency jet ventilation in nonintubated patients. *Turk Thorac J.* 2018; 19(3):127–131. doi: 10.5152/TurkThoracJ.2018.17025
41. Boatta E, Jahn C, Canuet M, et al. Pulmonary arteriovenous malformations embolized using a micro vascular plug system: technical note on a preliminary experience. *Cardiovasc Intervent Radiol.* 2017;40(2):296–301. doi: 10.1007/s00270-016-1493-0
42. Galmén K, Harbut P, Freedman J, et al. The use of high-frequency ventilation during general anaesthesia: an update. *F1000Res.* 2017;6:756. doi: 10.12688/f1000research.10823.1

43. Boatta E, Cazzato RL, De Marini P, et al. Embolisation of pulmonary arteriovenous malformations using high-frequency jet ventilation: benefits of minimizing respiratory motion. *Eur Radiol Exp.* 2019;3(1):26. doi: 10.1186/s41747-019-0103-8
44. Мороз В.В., Власенко А.В., Голубев А.М. ОРДС — патогенез и терапевтические мишени // Анестезиология и реаниматология. 2014. Т. 59, № 4. Р. 45–52. [Moroz VV, Vlasenko AV, Golubev AM. Pathogenesis and target therapy of ards. *Anesthesiology and Resuscitation.* 2014;59(4):45–52. (In Russ).]
45. Ranieri VM, Rubenfeld GD, Thompson BT, et al. Acute respiratory distress syndrome: the Berlin Definition. *JAMA.* 2012;307(23):2526–2533. doi: 10.1001/jama.2012.5669
46. Caironi P, Carlesso E, Cressoni M, et al. Lung recruitability is better estimated according to the Berlin definition of acute respiratory distress syndrome at standard 5 cm H<sub>2</sub>O rather than higher positive end-expiratory pressure: a retrospective cohort study. *Crit Care Med.* 2015;43(4):781–790. doi: 10.1097/CCM.0000000000000770
47. Chiumello D, Brioni M. Severe hypoxemia: which strategy to choose. *Crit Care.* 2016;20(1):132. doi: 10.1186/s13054-016-1304-7
48. Cherian SV, Kumar A, Akasapu K, et al. Salvage therapies for refractory hypoxemia in ARDS. *Respir Med.* 2018;141:150–158. doi: 10.1016/j.rmed.2018.06.030
49. Facchin F, Fan E. Airway pressure release ventilation and high-frequency oscillatory ventilation: potential strategies to treat severe hypoxemia and prevent ventilator-induced lung injury. *Respir Care.* 2015;60(10):1509–1521. doi: 10.4187/respcare.04255
50. Sklar MC, Fan E, Goligher EC. High-Frequency oscillatory ventilation in adults with ARDS: past, present, and future. *Chest.* 2017;152(6):1306–1317. doi: 10.1016/j.chest.2017.06.025
51. Klapsing P, Moerer O, Wende C, et al. High-frequency oscillatory ventilation guided by transpulmonary pressure in acute respiratory syndrome: an experimental study in pigs. *Crit Care.* 2018;22(1):121. doi: 10.1186/s13054-018-2028-7
52. Young D, Lamb SE, Shah S, et al. High-frequency oscillation for acute respiratory distress syndrome. *N Engl J Med.* 2013;368(9):806–813. doi: 10.1056/NEJMoa1215716
53. Ferguson ND, Cook DJ, Guyatt GH, et al. High-frequency oscillation in early acute respiratory distress syndrome. *N Engl J Med.* 2013;368(9):795–805. doi: 10.1056/NEJMoa1215554
54. Vincent JL. High-frequency oscillation in acute respiratory distress syndrome. The end of the story? *Am J Respir Crit Care Med.* 2017;196(6):670–671. doi: 10.1164/rccm.201703-0475ED
55. Derdak S, Mehta S, Stewart TE, et al. High-frequency oscillatory ventilation for acute respiratory distress syndrome in adults: a randomized, controlled trial. *Am J Respir Crit Care Med.* 2002;166(6):801–808. doi: 10.1164/rccm.2108052
56. Bollen CW, van Well GT, Sherry T, et al. High frequency oscillatory ventilation compared with conventional mechanical ventilation in adult respiratory distress syndrome: a randomized controlled trial [ISRCTN24242669]. *Crit Care.* 2005;9(4):R430–R439. doi: 10.1186/cc3737
57. Ng J, Ferguson ND. High-frequency oscillatory ventilation: still a role? *Curr Opin Crit Care.* 2017;23(2):175–179. doi: 10.1097/MCC.0000000000000387
58. Gattinoni L, Taccone P, Carlesso E, et al. Prone position in acute respiratory distress syndrome. Rationale, indications, and limits. *Am J Respir Crit Care Med.* 2013;188(11):1286–1293. doi: 10.1164/rccm.201308-1532CI
59. Scholten EL, Beitler JR, Prisk GK, et al. Treatment of ARDS with prone positioning. *Chest.* 2017;151(1):215–224. doi: 10.1016/j.chest.2016.06.032
60. Duan EH, Adhikari NK, D'Aragon F, et al. Management of acute respiratory distress syndrome and refractory hypoxemia. a multicenter observational study. *Ann Am Thorac Soc.* 2017;14(12):1818–1826. doi: 10.1513/AnnalsATS.201612-1042OC
61. Papazian L, Forel JM, Gacouin A, et al. Neuromuscular blockers in early acute respiratory distress syndrome. *N Engl J Med.* 2010;363(12):1107–1116. doi: 10.1056/NEJMoa1005372
62. Mehta C, Mehta Y. Management of refractory hypoxemia. *Ann Card Anaesth.* 2016;19(1):89–96. doi: 10.4103/0971-9784.173030
63. Cherian SV, Kumar A, Akasapu K, et al. Salvage therapies for refractory hypoxemia in ARDS. *Respir Med.* 2018;141:150–158. doi: 10.1016/j.rmed.2018.06.030
64. Kunugiyama SK, Schulman CS. High-frequency percussive ventilation using the VDR-4 ventilator: an effective strategy for patients with refractory hypoxemia. *AACN Adv Crit Care.* 2012;23(4):370–380. doi: 10.1097/NCI.0b013e31826e9031
65. Salim A, Martin M. High-frequency percussive ventilation. *Crit Care Med.* 2005;33(3 Suppl):S241–245. doi: 10.1097/01.ccm.0000155921.32083.ce
66. Kintala S, Liang M, Khusid F, et al. The use of high-frequency percussive ventilation for whole-lung lavage: a case report. *A A Pract.* 2018;11(8):205–207. doi: 10.1213/XAA.0000000000000778
67. Gulkarov I, Schiffenhaus J, Wong I, et al. High-frequency percussive ventilation facilitates weaning from extracorporeal membrane oxygenation in adults. *J Extra Corpor Technol.* 2018;50(1):53–57.
68. Godet T, Jabaudon M, Blondonnet R, et al. High frequency percussive ventilation increases alveolar recruitment in early acute respiratory distress syndrome: an experimental, physiological and CT scan study. *Crit Care.* 2018;22(1):3. doi: 10.1186/s13054-017-1924-6
69. Spapen H, De Regt J, van Gorp V, Honoré PM. High-frequency percussive ventilation in acute respiratory distress syndrome: knocking at the door but can it be let in? *Crit Care.* 2018;22(1):55. doi: 10.1186/s13054-018-1982-4
70. Michaels AJ, Hill JG, Sperley BP, et al. Use of HFPV for adults with ARDS: the protocolized use of high-frequency percussive ventilation for adults with acute respiratory failure treated with extracorporeal membrane oxygenation. *ASAIO J.* 2015;61(3):345–349. doi: 10.1097/MAT.0000000000000196

71. Boscolo A, Peralta A, Baratto F, et al. High-frequency percussive ventilation: a new strategy for separation from extracorporeal membrane oxygenation. *A A Case Rep.* 2015; 4(7):79–84. doi: 10.1213/XAA.0000000000000131
72. Wong I, Worku B, Weingarten JA, et al. High-frequency percussive ventilation in cardiac surgery patients failing mechanical conventional ventilation. *Interact Cardiovasc Thorac Surg.* 2017;25(6):937–941. doi: 10.1093/icvts/ivx237
73. Korzhuk A, Afzal A, Wong I, et al. High-frequency percussive ventilation rescue therapy in morbidly obese patients failing conventional mechanical ventilation. *J Intensive Care Med.* 2018;885066618769596. doi: 10.1177/0885066618769596
74. Starnes-Roubaud M, Bales EA, Williams-Resnick A, et al. High frequency percussive ventilation and low FiO<sub>2</sub>. *Burns.* 2012;38(7):984–991. doi: 10.1016/j.burns.2012.05.026
75. Carvalho I, Querido S, Silvestre J, et al. Heliox in the treatment of status asthmaticus: case reports. *Rev Bras Ter Intensiva.* 2016;28(1):87–91. doi: 10.5935/0103-507X.20160005
76. Keenan LM, Hoffman TL. Refractory status asthmaticus: treatment with sevoflurane. *Fed Pract.* 2019;36(10):476–479.
77. Maqsood U, Patel N. Extracorporeal membrane oxygenation (ECMO) for near-fatal asthma refractory to conventional ventilation. *BMJ Case Rep.* 2018;2018.bcr-2017-223276. doi: 10.1136/bcr-2017-223276
78. Lam E, Rochani A, Kaushal G, et al. Pharmacokinetics of ketamine at dissociative doses in an adult patient with refractory status asthmaticus receiving extracorporeal membrane oxygenation therapy. *Clin Ther.* 2019;41(5): 994–999. doi: 10.1016/j.clinthera.2019.03005
79. LaGrew JE, Olsen KR, Frantz A. Volatile anaesthetic for treatment of respiratory failure from status asthmaticus requiring extracorporeal membrane oxygenation. *BMJ Case Rep.* 2020;13(1):e231507. doi: 10.1136/bcr-2019-231507
80. Albecker D, Boudier TG, Lewis BF. High frequency percussive ventilation as a rescue mode for refractory status asthmaticus — a case study. *J Asthma.* 2021;58(3):340–343. doi: 10.1080/02770903.2019.1687714

### Информация об авторах

**Перепелица Светлана Александровна**, д.м.н., профессор, ведущий науч. сотр. [Svetlana A. Perepelitsa, Dr. Sci. (Med.), Professor, Senior Research Associate]; адрес: Россия, 236016, Калининград, ул. А. Невского, д. 14 [address: 14. Nevsky st., 236016, Kaliningrad, Russia]; e-mail: sveta\_perepeliza@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4539805>

**Кузовлев Артём Николаевич**, д.м.н., доцент [Artem N. Kuzovlev, Dr. Sci. (Med.), Assistant Professor]; e-mail: artem\_kuzovlev@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5930-0118>