

Особенности механики дыхания и газообмена при робот-ассистированной радикальной простатэктомии. Обзор литературы

И.И. Лутфарахманов¹, И.А. Мельникова²,
Е.Ю. Сырчин¹, В.Ф. Асадуллин¹, Ю.А. Корелов¹,
П.И. Миронов¹

¹ ФГБОУ ВО «Башкирский государственный медицинский университет» МЗ РФ, Уфа, Россия

² МАУЗ «Городская клиническая больница № 40»,
Екатеринбург, Россия

Реферат

Актуальность. Рак простаты остается самым распространенным урологическим злокачественным новообразованием, а робот-ассистированная радикальная простатэктомия (РАРП) является самым эффективным вариантом лечения. Специальные условия проведения операции (положение Тренделенбурга и пневмоперитонеум) увеличивают давление в дыхательных путях и снижают функциональную остаточную емкость легких.

Цель исследования. Обзор факторов риска нарушений и различных вмешательств для улучшения легочной функции и уменьшения неблагоприятных физиологических последствий РАРП под общей анестезией.

Материалы и методы. Обзор литературы был проведен с использованием поисковой системы PubMed в электронных базах данных Medline, Embase, Cochrane Library по май 2019 г.

Результаты. В общей сложности было включено 22 исследования, в том числе 9 рандомизированных контролируемых исследований. Фактором, способным ухудшить газообмен во время РАРП, был индекс массы тела < 30 кг/м². Улучшить газообмен возможно с помощью маневров рекрутмента. Положительное конечно-экспираторное давление 5–10 см вод. ст. улучшает оксигенацию, но требует осторожности у пациентов с хронической сердечной недостаточностью и хронической обструктивной болезнью легких.

Features of the mechanics of respiration and gas exchange during robot-assisted radical prostatectomy. Review

I.I. Lutfarakhmanov¹, I.A. Melnikova², E.Yu. Syrchin¹,
V.F. Asadullin¹, Yu.A. Korelov¹, P.I. Mironov¹

¹ FSBEI HE Bashkir State Medical University of the Ministry of Health of Russia, Ufa, Russia

² MAHI City Clinical Hospital № 40, Yekaterinburg, Russia

Abstract

Introduction. Prostate cancer remains the most common urological malignancy, and robot-assisted radical prostatectomy (RARP) is the most effective treatment option. Special conditions for operation (Trendelenburg position and pneumoperitoneum) increase the airway pressure and reduce functional residual capacity of the lungs.

Objectives. Review of risk factors for disorders and various interventions to improve pulmonary function and reduce the adverse physiological effects of RARP under general anesthesia.

Materials and methods. This review of literature was conducted using the PubMed search engine in electronic databases Medline, Embase, the Cochrane Library and others up to May 2019.

Results. A total of 22 studies were searched, including 9 randomized controlled trials. The factor that could worsen gas exchange during RARP was the body mass index < 30 kg/m². It is possible to improve gas exchange by means of recruitment maneuvers. Positive end-expiratory pressure of 5–10 cm H₂O improves oxygenation but requires alertness in patients with chronic heart failure and chronic obstructive pulmonary disease.

Conclusions. The main risk factors for perioperative respiratory and oxygenation disorders in RARP are pneumoperitoneum and steep Trendelenburg position. The effectiveness of ventilation regimes for the prevention of gas exchange disorders has not been proven. Using the recruitment maneuver and increasing the positive end-expiratory pressure does

Выводы. Основные факторы риска периоперационных нарушений механики дыхания и оксигенации при РАРП — пневмоперитонеум и крутое положение Тренделенбурга. Не доказана эффективность режимов ИВЛ для профилактики нарушений газообмена. Использование маневра рекрутмента и повышение положительного конечно-эспираторного давления не улучшает дыхательную функцию легких. Необходимы дальнейшие исследования с более длительным периодом наблюдения для определения клинической эффективности и безопасности РАРП.

Ключевые слова: рак простаты, робот-ассистированная простатэктомия, механика дыхания, газообмен

✉ **Для корреспонденции:** Лutfарахманов Ильдар Ильдусович — д-р мед. наук, доцент, заведующий кафедрой анестезиологии и реаниматологии с курсом ИДПО, ФГБОУ ВО «Башкирский государственный медицинский университет» Минздрава России, Уфа; e-mail: lutfarakhmanov@yandex.ru

✉ **Для цитирования:** Лutfарахманов И.И., Мельникова И.А., Сырчин Е.Ю., Асадуллин В.Ф., Корелов Ю.А., Миронов П.И. Особенности механики дыхания и газообмена при робот-ассистированной радикальной простатэктомии. Обзор литературы. Вестник интенсивной терапии им. А.И. Салтанова. 2020;1:75–89.

✉ **Поступила:** 07.11.2019

✉ **Принята к печати:** 02.03.2020

not improve the respiratory function of the lungs. Further studies with a longer follow-up period are needed to determine the clinical efficacy and safety of RARP.

Keywords: prostate cancer, robot-assisted prostatectomy, respiratory mechanic, gas exchange

✉ **For correspondence:** Ildar I. Lutfarakhmanov — Dr. Med. Sci., Docent, Head of the Department of Anesthesiology and Intensive Care, FSBEI HE Bashkir State Medical University of the Ministry of Health of Russia, Ufa; e-mail: lutfarakhmanov@yandex.ru

✉ **For citation:** Lutfarakhmanov II, Melnikova IA, Syrchin EYu, Asadullin VF, Korelov YuA, Mironov PI. Features of the mechanics of respiration and gas exchange during robot-assisted radical prostatectomy. Review. Annals of Critical Care. 2020;1:75–89.

✉ **Received:** 07.11.2019

✉ **Accepted:** 02.03.2020

DOI: 10.21320/1818-474X-2020-1-75-89

Введение

Рак простаты остается самым распространенным урологическим злокачественным новообразованием и второй ведущей причиной смерти от рака среди мужчин в США [1]. В России распространенность рака простаты составляет 150 на 100 000 населения, занимая третье место после злокачественных новообразований молочной железы и тела матки [2]. Из-за широкого использования простат-специфических тестов рак все чаще диагностируется на начальных стадиях, а радикальная простатэктомия является самым эффективным вариантом лечения. Впервые внедренная Binder и Kramer в 2001 г. робот-ассистированная радикальная простатэктомия (РАРП) революционизировала хирургическую технику и в последние годы стала доминирующим хирургическим подходом. В России робот-ассистированные оперативные вмешательства (da Vinci S HD Surgical System; Intuitive Surgical, Inc, Sunnyvale, California, США) проводятся на 26 роботических системах в Москве, Санкт-Петербурге, Екатеринбурге, Уфе и др. В сравнении с традиционной открытой простатэктомией преимущества РАРП — это более точные манипуляции с сосудами

и нервами, снижение интраоперационной кровопотери, меньше послеоперационной боли, меньшее количество осложнений, лучшие функциональные результаты и укорочение сроков пребывания в стационаре [3]. В сравнении с лапароскопической операцией РАРП сопровождается вдвое меньшей кровопотерей и потребностью в гемотрансфузии, но большей длительностью анестезии и интраоперационной потребностью в опиатах, а также вдвое большей частотой послеоперационной тошноты и рвоты [4]. Несмотря на преимущества, операция РАРП требует специального позиционирования тела пациента в крутом (25–45°) положении Тренделенбурга (ПТр) с согнутой головой и пневмоперитонеума. Действие гравитации позволяет отделить органы брюшной полости от полости таза и обеспечивает лучший хирургический доступ к простате. Это нефизиологическое положение в течение длительного времени увеличивает внутрибрюшное и внутригрудное давление, тем самым повышая давление в дыхательных путях и снижая функциональную остаточную емкость легких.

Высокое давление пневмоперитонеума вместе с крутым ПТр в процессе РАРП привело к неблаго-

приятным последствиям в 5,1–8,8 % случаев [5, 6]. Weber E. et al. (2007) впервые сообщили о развитии задней ишемической оптической нейропатии [7]. В качестве причины осложнения авторы выделили два фактора: длительное время операции и крутое ПТр. Внутриглазное давление достигало пикового значения при 25° ПТр и 15 мм рт. ст. пневмоперитонеуме в среднем на 13,3 мм рт. ст. выше исходного значения [8]. Давление в среднем ухе было значимо выше исходного начиная со второго часа 15 ± 5 мм рт. ст. пневмоперитонеума в крутом ПТр параллельно с повышением давления углекислого газа [9]. Ранее сообщалось о 0–0,56%-й частоте сердечно-легочных осложнений с летальностью до 0,55 % [4, 10, 11]. Были описаны случаи постэкстубационного отека верхних дыхательных путей, приведшие к дыхательной недостаточности с потребностью в установке назофарингеального воздуховода или повторной интубации трахеи. Отек гортани, вероятнее всего, был вызван уменьшением венозного оттока от головы, обусловленным пневмоперитонеумом и длительным (3–4,5 ч) 40–45° ПТр [12, 13]. Было сообщено о 17 % случаев газовой эмболии по данным чреспищеводной эхокардиографии при выделении глубокого дорсального венозного комплекса при 30° ПТр и 15 мм рт. ст. пневмоперитонеуме [14]. Был описан случай фатального инфаркта миокарда у пациента с ишемической болезнью сердца вследствие интраоперационных проблем — ПТр и пневмоперитонеума [15]. Также было сообщено о пациенте, у которого отек легких развился после 4-часового пневмоперитонеума с высоким внутрибрюшным давлением и 30° ПТр [16].

Здесь мы предлагаем обзор факторов риска нарушений и различных вмешательств для улучшения легочной функции и уменьшения неблагоприятных физиологических последствий РАРП под общей анестезией.

Методы исследования

Мы включили в обзор только изданные статьи, в которых описывались исследования влияния факторов риска нарушений легочной функции и исследования эффектов различных вмешательств для улучшения механики дыхания и газообмена во время РАРП под общей анестезией. Поиск статей велся в электронных базах данных PubMed, Embase, Cochrane Central Register of Controlled Trials, Web of Science, Google Scholar по май 2019 г. по следующим ключевым словам: prostatectomy, robotic surgery, robotic assisted, robot-assisted laparoscopic radical prostatectomy, pneumoperitoneum, Trendelenburg position, respiratory mechanics, airway pressure, airway resistance, inspiratory to expiratory ratio, lung compliance, dead space, arterial oxygenation, gas exchange, carbon dioxide, hemodynamics, mechanical ventilation, pressure-controlled ventilation, volume-controlled

ventilation, equal ratio ventilation, lung recruitment maneuver, positive end-expiratory pressure. После того как 2 исследователя выбрали подходящие статьи, все разногласия по поводу первичного отбора разрешались путем обсуждения с рецензентом. Окончательно выбранный список статей также обсуждался для подтверждения потенциально приемлемых исследований.

Статьи были включены в обзор, если удовлетворяли следующим критериям:

- вид статьи: сравнительные исследования во всех публикуемых международных журналах без языковых или национальных ограничений;
- субъекты: пациенты с раком простаты, подвергшиеся РАРП;
- вмешательства: исследования, сравнивающие факторы риска или вмешательства для улучшения механики дыхания и газообмена во время РАРП.

Из выбранных статей другие два исследователя независимо извлекали следующие данные: фамилию, имя, отчество (при наличии) первого автора; страна; год публикации; дизайн исследования; количество пациентов (*n*), их характеристики: функциональный класс Американского общества анестезиологов (ASA), индекс массы тела (ИМТ), критерии исключения, осложнения; режимы искусственной вентиляции легких (ИВЛ): вентиляция с контролем по давлению (ВКД), вентиляция с контролем по объему (ВКО), вентиляция с контролем по давлению и гарантированным дыхательным объемом (ВКД-ГО), вентиляция с контролем по давлению (объему) и реверсным соотношением времени вдоха ко времени выдоха (ВКД(О)-РС); базовые и переменные параметры вентиляции: дыхательный объем (ДО), частота дыхания (ЧД), соотношение времени вдоха ко времени выдоха (I:E ratio), инспираторная пауза (ИП), фракция вдыхаемого кислорода (FiO_2), наличие положительного конечно-экспираторного давления (РЕЕР); показатели газообмена: парциальное давление кислорода в артериальной крови (PaO_2), парциальное давление углекислого газа в артериальной крови ($PaCO_2$), парциальное давление конечно-экспираторного углекислого газа ($EtCO_2$), насыщения крови кислородом (SpO_2), респираторный индекс (PaO_2/FiO_2); механику дыхания: пиковое давление в дыхательных путях (AP_{peak}), среднее давление в дыхательных путях (AP_{mean}), давление плато в дыхательных путях (AP_{plat}), вентиляционное давление в дыхательных путях (AP_{driv} — разница между давлением плато и конечно-экспираторным давлением), динамическая податливость респираторной системы (C_{dyn}) или легких (C_{lung}), физиологическое «мертвое» пространство (МПфиз); наличие и характеристики маневра рекрутмента (МР). Пропущенные значения обозначены аббревиатурой НД — «нет данных».

Проведение исследования одобрено локальным этическим комитетом ФГБОУ ВО «Башкирский госу-

дарственный медицинский университет» Минздрава России, протокол № 10 от 05.12.2018.

Результаты исследования

Мы нашли пять полнотекстовых статей, описывающих сравнительные исследования влияния факторов риска нарушений легочной функции [17–21] (табл. 1) и девять полнотекстовых статей, описывающих сравнительные исследования эффектов различных вмешательств для улучшения легочной функции при РАРП [22–30] (табл. 2). Включенные статьи состояли из трех одноцентровых [17, 18, 21], одного многоцентрового [19] проспективных и одного ретроспективного [20] исследований; восьми рандомизированных исследований с параллельными группами [22–25, 27–30] и одного рандомизированного перекрестного исследования [26]. В качестве факторов риска нарушений легочной функции были угол наклона операционного стола при ПТр [17], возраст [18], ИМТ [19–21]. В качестве вмешательства для улучшения легочной функции были три исследования режимов ИВЛ [22–24], три исследования различных соотношений времени вдоха ко времени выдоха [25–27] и три исследования эффективности маневра рекрутмента [28–30]. В качестве временных точек сравнения переменных нами были выбраны: $T_{исх}$ — после индукции анестезии и интубации трахеи в горизонтальном положении пациента, $T_{\max/\min}$ — максимальное/минимальное значение за время операции, $T_{кон}$ — после десуффляции газа из брюшной полости в горизонтальном положении пациента. Мы не включили в обзор три статьи, описывающие факторы риска дыхательных нарушений, в которых не использовались переменные дыхательной механики и газообмена [31], не было групп сравнения [32, 33] и не было интраоперационного измерения дыхательной механики [34]; две статьи, описывающие нереспираторные методы улучшения дыхательной механики ввиду отсутствия групп сравнения [36, 37]; одну статью, в которой не описывались параметры дыхательной механики [38]; и одну статью, в которой было более двух групп сравнения [39].

Факторы риска нарушений легочной функции при РАРП

Поскольку новые малоинвазивные методы оперативного лечения становятся все более популярными, пациенты и медработники сталкиваются с послеоперационными осложнениями, которые связаны с экстренной интубацией и ИВЛ, а также с более длительным пребыванием в стационаре. Поэтому врачи анестезиологи-реаниматологи должны понимать физиологические

изменения, связанные с пневмоперитонеумом и ПТр во время РАРП, оценивать факторы риска ожидаемых осложнений и принимать соответствующие решения для предотвращения дальнейшего ухудшения состояния пациентов [40].

В обсервационном исследовании было показано, что пациенты после РАРП имеют более высокий риск послеоперационной дыхательной недостаточности. Общая частота отсроченной (> 48 ч) экстубации трахеи составила 27,5 %, что является относительно высоким показателем. В мультифакторном анализе оператор-зависимые интраоперационная гемотрансфузия и длительность ПТр 400 мин и более, но не пациент-зависимый ИМТ 23 кг/м² и более показали себя значимыми факторами риска послеоперационных легочных осложнений [31].

После перевода пациентов в крутое 40° ПТр и наложения 12 мм рт. ст. пневмоперитонеума вентиляция «мертвого» пространства увеличилась на 50 % и вернулась к базовым значениям после устранения ПТр. Несмотря на ожидаемое нарастание ателектаза и снижение функциональной остаточной емкости легких, легочный газообмен оставался адекватным [32].

В обсервационном исследовании было показано, что 40° ПТр в комбинации с пневмоперитонеумом значительно изменяло дыхательную механику и газообмен. Через 2 ч операции EtCO₂ увеличилось с 30,9 до 35,9 мм рт. ст., APplat увеличилось с 14 до 26 см вод. ст. и податливость респираторной системы уменьшилась с 50 до 23 мл/см вод. ст. В целом комбинация ПТр и пневмоперитонеума хорошо переносилась пациентами, и гемодинамические и легочные переменные оставались в клинически приемлемых пределах [33].

Исследование влияния 20°, 25° и 30° угла ПТр в условиях пневмоперитонеума на дыхательную механику и газообмен продемонстрировало, что по мере увеличения угла наклона EtCO₂ и APpeak имели тенденцию к увеличению, а C_{dyn} имела тенденцию к уменьшению. Таким образом, отрицательные эффекты ПТр и пневмоперитонеума на дыхательную систему были сильнее при более глубоком угле наклона [17].

Парциальное давление углекислого газа и артерио-альвеолярный градиент углекислого газа прогрессивно увеличивались по мере нахождения пациентов в условиях крутого ПТр и пневмоперитонеума, гораздо выше у пациентов старшей возрастной группы по сравнению с пациентами среднего возраста [18].

Сопrotивление верхних и нижних дыхательных путей и носовой поток воздуха были оценены у пациентов в крутом ПТр. Максимальный поток вдоха и выдоха увеличился, а носовой поток воздуха уменьшился непосредственно после операции и нормализовался через 24 ч. У пациентов без легочных заболеваний жизненная емкость легких и объем форсированного выдоха уменьшились к концу 1-х суток и восстановились к 5-му дню, тогда как у пациентов с хронической обструктивной бо-

лезнью легких (ХОБЛ) подобные изменения продолжались более 5 дней [34].

С другой стороны, динамика чувствительности барорефлекса при лапароскопической колоректальной хирургии у пациентов с различной чувствительностью периферического хеморефлекса, оцениваемой с помощью пробы с пороговой задержкой дыхания, не была подвержена пневмоперитонеумом [35].

Влияние избыточной массы тела на артериальную оксигенацию и гемодинамику было изучено у пациентов в условиях длительного пневмоперитонеума. Результаты исследования показали, что пациенты даже с умеренным превышением ИМТ в 25–29,9 кг/м² имели худшую оксигенацию и более высокий альвеолярно-артериальный градиент кислорода после начала анестезии и перевода в ПТр. Разумное объяснение этому авторы нашли в перераспределении легочного кровотока от хуже вентилируемых за счет ателектазов к лучше вентилируемым областям легких [19].

Несмотря на то что PaO₂ неизменно снижалось с 395 до 316 мм рт. ст., а разница PaCO₂ — EtCO₂ нарастала с 10,0 до 13,4 мм рт. ст., ни у одного из пациентов, перенесших РАРП, не было периоперационных дыхательных осложнений. Единственным отличием дыхательной механики пациентов с ИМТ > 25 кг/м² было значимое превышение AP_{peak} сразу после интубации трахеи [20].

Возможную корреляцию между 45° ПТр в сочетании с пневмоперитонеумом и изменениями дыхательной механики оценивали у пациентов с различным ИМТ. Результаты исследования показали, что увеличение AP_{peak} > 35 см вод. ст., AP_{driv} > 30 см вод. ст. и снижение Clung более чем на 50 % напрямую коррелировали с ИМТ 30 кг/м² и выше [21]. Данные находки очень важны для анестезиолога, поскольку актуализируют потенциальный риск легочного повреждения из-за повышенного давления в дыхательных путях вследствие улучшения операционного доступа.

Таким образом, РАРП выполняется в основном пациентам средней или старшей возрастной группы с присущими им сопутствующими заболеваниями. Абсолютные противопоказания включают выраженные нарушения в системе гемостаза и повышение внутричерепного давления, к относительным противопоказаниям относятся сердечная недостаточность, ХОБЛ тяжелой степени. Особое внимание следует обратить на тучных пациентов с ИМТ > 30 кг/м², поскольку ожирение само по себе влечет серьезные физиологические нарушения в системах дыхания и кровообращения, прежде всего снижение жизненной емкости легких, гиповентиляцию, гиперкапнию и гипоксемию. В ПТр эти нарушения усугубляются до того, что остаточный объем закрытия мелких дыхательных путей становится равным или превышает

функциональную остаточную емкость легких, что сопровождается нарушением вентиляционно-перфузионного соотношения и увеличением внутрилегочного шунтирования.

Нереспираторные вмешательства для улучшения легочной функции при РАРП

Инсуффляция углекислого газа в брюшную полость оказывает влияние на различные органы и системы. Повышенное внутрибрюшное давление влияет на венозный возврат, системное сосудистое сопротивление и функцию миокарда. Первоначально вследствие аутотрансфузии депонированной крови из спланхического кровообращения происходит увеличение объема циркулирующей крови, что приводит к увеличению венозного возврата и сердечного выброса. Однако дальнейшее увеличение внутрибрюшного давления ведет к компрессии нижней полой вены, снижению венозного возврата и последующему снижению сердечного выброса. Объем легких уменьшается, среднее артериальное давление увеличивается, тогда как сердечный индекс уменьшается, а поглощение углекислого газа вызывает гиперкапнию и сопутствующее снижение рН крови [20, 41]. Любой из этих факторов может привести к осложнениям со стороны сердечно-сосудистой и дыхательной систем.

Безгазовая лапароскопическая операция проводится для уменьшения отрицательных эффектов карбоксиперитонеума. Брюшная стенка приподнимается с помощью системы пневмолифтинга, чтобы создать пространство для работы хирурга без наложения карбоксиперитонеума. В наблюдательном исследовании поднятие брюшной стенки имитировало безгазовую РАРП, увеличивая внутрибрюшное пространство у пациентов в ПТр и позволило снизить AP_{peak} с 34 до 29 см вод. ст. [36].

Влияние низкого (8 мм рт. ст.) давления пневмоперитонеума, созданного с помощью бесклапанной системы AirSeal, на дыхательную механику было оценено при 45° ПТр. В течение операции только AP_{mean} показало статистически значимое изменение в сравнении с исходным значением. Хотя при наложении пневмоперитонеума и перевода пациента в крутое ПТр наблюдались другие значительные гемодинамические и дыхательные изменения, они всегда оставались в пределах, безопасных для пациента [37].

Таким образом, пневмолифтинг, хотя не устраняет все побочные эффекты карбоксиперитонеума и высокого абдоминального давления, полезен для улучшения вентиляции пациента и уменьшения осложнений высокого давления в дыхательных пу-

Таблица 1. Обзор сравнительных исследований влияния факторов риска на дыхательную механику и газообмен при РАРП

Страна, год, источник	Япония, 2013 [17]	Южная Корея, 2012 [18]	Германия, 2006 [19]	США, 2015 [20]	Германия, 2019 [21]
Дизайн исследования	Одноцентровое проспективное контролируемое	Одноцентровое проспективное контролируемое	Многоцентровое проспективное контролируемое	Одноцентровое observationalное	Одноцентровое проспективное нерандомизированное
Пациенты	ASA I-II класс (n = 35)	ASA I-II класс (n = 92)	ASA I-III класс (n = 30)	ASA II-III класс (n = 32)	ASA I-III класс (n = 51)
Критерии исключения	Клапанная сердечная патология, инфаркт миокарда, ХОБЛ, рестриктивные болезни легких, курительщики, почечная дисфункция, неврологические болезни	Сердечно-легочные болезни, ненормальная спирография	Тяжелые легочные или сердечные болезни	Возраст > 72 лет, ИМТ > 38 кг/м ²	Глазные болезни, возраст > 80 лет, ИМТ > 40 кг/м ² , ASA > III класса, сердечная недостаточность, ХОБЛ, легочная гипертензия
Цель исследования	Исследовать влияние 20°, 25° и 30° ПТР на сердечно-сосудистую и дыхательную системы	Оценить взаимосвязь между возрастом и артерио-альвеолярным градиентом углекислого газа	Оценить гемодинамику и газообмен у пациентов с нормальным и избыточным ИМТ	Оценить повреждение оксигенации и вентиляции у пациентов с нормальным и избыточным ИМТ	Оценить влияние ИМТ > 30 кг/м ² на легочную функцию
Базовые параметры вентиляции	ДО 10 мл/кг; целевое EtCO ₂ 30–40 мм рт. ст.; I:E ratio 1:2; PEEP 0 см вод. ст.; FiO ₂ 0,33–0,5; целевая SpO ₂ > 98%	ВКО: ДО 10 мл/кг; целевое EtCO ₂ 30–38 мм рт. ст.; I:E ratio 1:2; FiO ₂ 0,5	Целевые параметры: pH 7,35–7,45; BE ± 3 ммоль/л; HCO ₃ ⁻ 21–27 ммоль/л; PaCO ₂ 35–40 мм рт. ст. PEEP 5 см вод. ст.; FiO ₂ 0,5	ВКД: ДО 6 мл/кг; ЧД 10 в мин; I:E ratio 1:1; PEEP 5 см вод. ст.; AРreak ≤ 40 см вод. ст.; FiO ₂ 1,0	ВКО: ДО 8 мл/кг; ЧД 10 в мин; целевое EtCO ₂ 30–40 мм рт. ст.; I:E ratio 1:1; PEEP 5–8 см вод. ст.; целевые SpO ₂ > 96% / PaO ₂ > 90 мм рт. ст.
Давление пневмоперитонеума, мм рт. ст.	12	10–13	12	15	15
Длительность операции, мин	212 ± 27	215 ± 44	415 ± 151	≈ 180	210 ± 61
	218 ± 32	212 ± 44	465 ± 134		230 ± 54
Переменные	20 (n = 11)	30 (n = 12)	30	30	45
	63,8 ± 4,7	65,7 ± 4,3	61 ± 8	61,6 ± 7,4	64,0 ± 8,3
	23,2 ± 2,4	24,2 ± 2,2	< 25 (n = 15)	< 25 (n = 14)	< 30 (n = 32)
АРreak, см вод. ст.	14,0 ± 1,6	14,5 ± 1,8	15 ± 1	15,3 ± 2,0	15,0 ± 2,2
	23,5 ± 2,6*	24,3 ± 2,6*	26 ± 3*	30,6 ± 4,2	31,4 ± 4,8*
	14,2 ± 1,7	15,4 ± 2,1	19 ± 2*	18,3 ± 4,4	19,1 ± 4,0
T _{исх}	ND	ND	24 ± 3**	18,3 ± 4,4	24,7 ± 3,8#
T _{макс}	ND	ND	24 ± 3**	18,3 ± 4,4	24,7 ± 3,8#
T _{кон}	ND	ND	24 ± 3**	18,3 ± 4,4	24,7 ± 3,8#

Таблица 1. Окончание

Страна, год, источник	Япония, 2013 [17]	Южная Корея, 2012 [18]	Германия, 2006 [19]	США, 2015 [20]	Германия, 2019 [21]
APd _{iv} , см вод. ст.	T _{исх}	НД	Численные значения не представлены	НД	8,8 ± 2,2
	T _{макс}				12,6 ± 3,2 [#]
	T _{кон}				24,5 ± 4,8* 17,7 ± 3,6*
Сдуп, мл/см вод. ст.	T _{исх}	52,2 ± 7,6	Численные значения не представлены	НД	60,7 ± 11,7
	T _{мин}	23,7 ± 3,6*			24,3 ± 5,0*
	T _{кон}	НД			45,5 ± 8,7
EtCO ₂ , мм рт. ст.	T _{исх}	30,5 ± 2,7	Численные значения не представлены	30,0 ± 3,5 34,4 ± 4,0 33,8 ± 5,8	НД
	T _{макс}	30,8 ± 2,1			
	T _{кон}	НД			
Осложнения	Не было осложненной анестезии и операции	НД	Не было сердечно-сосудистых осложнений	Не было гипоксемии, ателектаза, пневмонии	Не было дыхательных осложнений
Выводы	ПТр влияет на сердечно-сосудистую и дыхательную системы; податливость легких уменьшается при увеличении угла наклона	С возрастом увеличивается артерио-альвеолярный градиент углекислого газа	Превышение ИМТ 25–29,9 кг/м ² ведет к худшей оксигенации и большему альвеолярно-артериальному градиенту кислорода	У пациентов с ИМТ > 25 кг/м ² значительно повышено давление в дыхательных путях	Увеличение давления в дыхательных путях и уменьшение податливости легких коррелируют с ИМТ ≥ 30 кг/м ²

* — статистически значимые различия T_{исх}–T_{макс/мин} в пределах одной группы пациентов;

— статистически значимые различия между группами пациентов в пределах одной временной точки сравнения.

Данные представлены как среднее ± стандартное отношение.

ВКД — вентиляция с контролем по давлению; ВКО — вентиляция с контролем по объему; ДО — дыхательный объем; ИМТ — индекс массы тела; НД — нет данных; ПТр — положение Тренделенбурга; ХОБЛ — хроническая обструктивная болезнь легких; ЧД — частота дыханий; APd_{iv} — вентиляционное давление в дыхательных путях; APreak — пиковое давление в дыхательных путях; ASA — Американское общество анестезиологов; BE — избыток (дефицит) оснований крови; Сдуп — динамическая податливость респираторной системы; EtCO₂ — парциальное давление конечно-экспираторного углекислого газа; HCO₃⁻ — гидрокарбонаты крови; I:E ratio — соотношение времени вдоха ко времени выдоха; FiO₂ — фракция вдыхаемого кислорода; I — количество пациентов; PaCO₂ — парциальное давление углекислого газа в артериальной крови; PaO₂ — парциальное давление кислорода в артериальной крови; PEER — положительное конечно-экспираторное давление; SpO₂ — насыщение крови кислородом.

Таблица 2. Обзор сравнительных исследований дыхательной механики и газообмена при PАРП

Страна, год, источник	Южная Корея, 2011 [22]		Индия, 2017 [23]		Южная Корея, 2018 [24]		Япония, 2018 [25]			
Дизайн исследования ¹	Рандомизированное слепое		Рандомизированное		Рандомизированное двойное слепое		Рандомизированное			
Цель исследования	Исследовать преимущества ВКД над ВКО по дыхательной механике и гемодинамике		Исследовать эффекты ВКО и ВКД на дыхательную механику и гемодинамику		Сравнить эффекты ВКД-ГО и ВКО-РС на газообмен, дыхательную механику и гемодинамику		Изучить влияние ВКД-РС на компоненты «мертвого» пространства			
Пациенты	ASA I-II класс		20–70 лет, ИМТ 18–30 кг/м ² , ASA I-II класс		20–80 лет		18–85 лет, ASA I-II класс			
Критерии исключения	Инфаркт миокарда, клапанная сердечная патология, ХОБЛ, рестриктивные болезни легких, курительщики, неврологические болезни, почечная дисфункция, ИМТ > 31 кг/м ²		Морбидное ожирение, астма, ХОБЛ, рестриктивные болезни легких, легочное сердце, гепаторенальная дисфункция, острые сердечные болезни		ХОБЛ, ОРЗ, другие легочные болезни, ФВЛЖ < 50%, ИМТ > 30 кг/м ²		Пневмоторакс, операции на легких			
Базовые параметры вентиляции	ДО 8 мл/кг; целевое EtCO ₂ 38 ± 2 мм рт. ст.; I:E ratio 1:2; РЕЕР 0 см вод. ст.; FiO ₂ 0,5		ДО 8 мл/кг; целевое EtCO ₂ 35–40 мм рт. ст.; I:E ratio 1:2; РЕЕР 4 см вод. ст.; FiO ₂ 0,5		ДО 8 мл/кг; целевое EtCO ₂ 35–45 мм рт. ст.; ИП 10%; РЕЕР 0 см вод. ст.; FiO ₂ 0,5		ДО 8–10 мл/кг; ЧД 10–12 в мин; РЕЕР 4 см вод. ст.; FiO ₂ 0,5			
Переменные вентиляции	ВКД: (n = 17)	ВКО: (n = 17)	ВКД: (n = 30)	ВКО: (n = 30)	ВКД-ГО: I:E ratio 1:2 (n = 39)	ВКО-РС: I:E ratio 1:1 (n = 39)	ВКД-РС: I:E ratio 1:1 – 2:1 (n = 6)	ВКО: I:E ratio 1:2 (n = 7)	ВКД: I:E ratio 1:2 (n = 7)	
APreak, см вод. ст.	T _{иск}	12,3 ± 1,6	12,9 ± 2,0	18,4	17,1	14 (13–15)	14 (13–15)	–	НД	–
	T _{макс}	29,0 ± 5,8* [†]	35,7 ± 4,7*	28,1 [†]	32,3	28 (26–32)	29 (27–33)	–	24,7 ± 2,5	–
	T _{кон}	15,1 ± 1,8*	17,0 ± 1,8*	18,4	17,5	17 (16–19)	18 (17–19)	–	НД	–
APplat (APmean [22, 23, 27]), см вод. ст.	T _{иск}	3,8 ± 0,8	3,5 ± 1,2	7,6	7,6	4,0 (4,0–4,3)	4,0 (4,0–4,0)	НД	–	НД
	T _{макс}	10,2 ± 2,0*	9,5 ± 1,5*	11,97	11,97	9,0 (8,0–9,0) [†]	10,0 (9,0–11,0)	20,8 ± 2,5 [†]	–	21,7 ± 2,7
	T _{кон}	4,4 ± 0,6*	4,5 ± 0,5*	7,7	8,1	5,0 (4,0–5,0)	5,0 (5,0–6,0)	НД	–	НД
C _{dyn} , мл/см вод. ст.	T _{иск}	42,8 ± 6,3	43,1 ± 6,0	36,0	40,0	41,2 (37,0–45,1)	43,4 (36,7–47,4)	НД		
	T _{мин}	18,6 ± 3,6* [†]	15,5 ± 1,8*	21,6 [†]	18,2	19,2 (17,4–21,6)	18,1 (16,4–20,9)			
	T _{кон}	34,8 ± 4,0*	32,4 ± 4,0*	35,4	36,7	37,0 (32,1–39,9)	35,7 (31,0–38,9)			
PaO ₂ (PaO ₂ /FiO ₂ [25]), мм рт. ст.	T _{иск}	196 ± 36	187 ± 39	189 ± 62	195 ± 45	186 (160–218)	178 (152–209)	НД		
	T _{мин}	165 ± 42*	168 ± 48*	НД		177 (143–196)	181 (159–204)	419 ± 88 [†]	401 ± 88	412 ± 89
	T _{кон}			198 ± 68	182 ± 47	189 (162–203)	197 (171–210)	НД		
EtCO ₂ (PaCO ₂ [30]), мм рт. ст.	T _{иск}	НД		36,1 ± 4,6	36,6 ± 4,1	34 (32–36)	34 (33–36)	НД		
	T _{макс}	НД		НД		39 (37–43)	42 (37–45)	39,5 ± 5,1 [†]	42,3 ± 5,4	41,4 ± 5,2
	T _{кон}	НД		41,1 ± 7,3 [†]	44,7 ± 6,2	41 (39–45)	43 (39–47)	НД		
МПфиз, %	T _{иск}	6,3 ± 5,8	6,5 ± 4,6	НД		НД		НД		
	T _{макс}	15,5 ± 9,1*	15,9 ± 9,8*	НД		НД		29,2 ± 4,7 [†]	43 ± 8,5	35,9 ± 3,9
	T _{кон}	9,1 ± 6,2	10,5 ± 9,2*	НД		НД		НД		

Южная Корея, 2018 [26]		Южная Корея, 2015 [27]		Южная Корея, 2016 [28]		Южная Корея, 2017 [29]		Япония, 2019 [30]	
Рандомизированное двойное слепое перекрестное		Рандомизированное двойное слепое		Рандомизированное слепое		Рандомизированное слепое		Рандомизированное слепое	
Изучить эффекты удлиненного времени вдоха на газообмен		Изучить эффекты удлиненного времени вдоха на дыхательную механику и гемодинамику		Сравнить эффекты маневра рекрутмента на системную оксигенацию и податливость легких		Оценить эффективность маневра рекрутмента на оксигенацию, дыхательную механику и легочные осложнения		Оценить эффекты маневра рекрутмента на податливость легких и газы крови	
≥ 20 лет, ASA I–III класс		ASA I–II класс		20–75 лет		60–80 лет, ASA I–II класс		20–70 лет, ASA I–II класс	
Патология верхних дыхательных путей, тяжелый сколиоз, пневмоэктомия, ХОБЛ, ИБС; сердечная, почечная, печеночная недостаточность; ИМТ > 30 кг/м ²		Патология верхних дыхательных путей, ОРЗ, хронические легочные болезни, ИБС, сердечная недостаточность, ИМТ > 30 кг/м ²		ХОБЛ, дыхательная недостаточность, ненормальная спирография; почечная, печеночная дисфункция; экстренная операция		Инфаркт миокарда, ХОБЛ, рестриктивные болезни легких, курильщики; сердечные, нейромышечные, неврологические, легочные, почечные болезни; деменция, ИМТ > 31 кг/м ²		ХОБЛ, курильщики; почечная, сердечная недостаточность; ИМТ ≥ 30 кг/м ²	
ВКО: ДО 7 мл/кг; целевое EtCO ₂ 35–40 мм рт. ст.; ИП 20%; РЕЕР 5 см вод. ст.; FiO ₂ 0,5		ВКО: ДО 8 мл/кг; целевое EtCO ₂ 38 ± 2 мм рт. ст.; ИП 10%; РЕЕР 0 см вод. ст.; FiO ₂ 0,5		ВКО: ДО 6 мл/кг; ЧД 8–12 в мин; РЕЕР 15 см вод. ст.; FiO ₂ 0,4		ВКД: ДО 6–8 мл/кг; целевое EtCO ₂ 40–60 мм рт. ст.; I:E ratio 1:2; РЕЕР 5 см вод. ст.; FiO ₂ 0,4		ВКО: ДО 7 мл/кг; целевое EtCO ₂ 40–50 мм рт. ст.; I:E ratio 1:2; ИП 10%; РЕЕР 0 см вод. ст.; FiO ₂ 0,5	
I:E ratio: 1:2 → 1:1 (n = 15)	I:E ratio: 1:1 → 1:2 (n = 17)	I:E ratio: 1:1 (n = 39)	I:E ratio: 1:2 (n = 40)	MP: 40 см вод. ст. (n = 30)	Нет (n = 30)	MP: 16 см вод. ст. (n = 26)	Нет (n = 25)	MP: 30 см вод. ст. (n = 10)	РЕЕР: 5 см вод. ст. (n = 9)
15,7 ± 1,8	15,5 ± 2,1	12,8 ± 2,2	13,2 ± 1,9	НД		13,1 ± 3,9	12,4 ± 2,5	НД	
28,9 ± 2,9*	30,5 ± 3,4*	28,4 ± 4,0*#	32,8 ± 5,2*			28,3 ± 3,6*	28,2 ± 3,0*		
15,8 ± 2,0	18,3 ± 4,3*	17,1 ± 2,9*#	18,7 ± 2,6*			НД			
13,5 ± 1,5	13,1 ± 2,5	11,9 ± 2,1	12,9 ± 1,9	НД		12,9 ± 3,1	12,4 ± 2,6	9 ± 2	10 ± 1
26,5 ± 3,2*	29,3 ± 3,9*	27,7 ± 4,3*#	30,9 ± 5,3*			23,1 ± 3,9*	23,2 ± 3,0*	22 ± 3*	22 ± 2*
14,4 ± 1,6	16,1 ± 3,8	15,3 ± 2,6*	16,7 ± 3,1*			НД		14 ± 2*	15 ± 2*
43,7 ± 7,9	45,1 ± 7,6	51,3 ± 8,4	49,2 ± 8,1	36,9 ± 6,7	33,8 ± 5,4	33,6 ± 8,9	34,8 ± 7,2	45 ± 6	43 ± 3
19,4 ± 2,0*	18,3 ± 3,4*	20,2 ± 3,4*	18,6 ± 3,7*	22,0 ± 4,3*	21,3 ± 4,3*	17,8 ± 4,9*	17,5 ± 2,6*	22 ± 3*	23 ± 4*
43,1 ± 10,6	37,6 ± 8,8*	37,1 ± 5,3*	36,1 ± 9,2*	36,0 ± 5,7	33,5 ± 6,9	НД		47 ± 7	45 ± 3
211 ± 49	243 ± 77	205 ± 38	204 ± 44	214 ± 55	226 ± 48	153 ± 61	143 ± 45	145 ± 37	144 ± 37
161 ± 45*	176 ± 51*	167 ± 36*	153 ± 35*	214 ± 42 [†]	188 ± 41*	144 ± 40*	136 ± 39*	137 ± 45	153 ± 31
192 ± 69	183 ± 43*	170 ± 30*	159 ± 34*	224 ± 41	211 ± 39	НД		181 ± 37*	175 ± 26*
32,5 ± 2,7	32,8 ± 2,3	32,8 ± 2,2	32,8 ± 2,5	НД		32,8 ± 2,7	33,7 ± 2,8	40 ± 4	38 ± 6
33,7 ± 4,6	35,6 ± 7,5	39,8 ± 4,1*	40,8 ± 4,4*			35,6 ± 2,8	35,4 ± 2,8	46 ± 7	47 ± 6*
33,6 ± 3,96	35,6 ± 4,1	39,3 ± 4,6*	39,8 ± 4,8*			НД		43 ± 4	40 ± 6
НД		НД		НД		НД		НД	

Таблица 2. Окончание

Страна, год, источник	Южная Корея, 2011 [22]	Индия, 2017 [23]	Южная Корея, 2018 [24]	Япония, 2018 [25]
Осложнения	Не было SpO ₂ < 95 %	НД	Послеоперационная лихорадка у 24,4 % пациентов	Не было AP _{peak} или AP _{plat} > 30 см вод. ст., SpO ₂ < 95 %, других легочных осложнений
Выводы	Преимущество ВКД над ВКО в большей C _{dyn} меньшем AP _{peak} , но не оксигенации или гемодинамике	Меньшее AP _{peak} и ЦВД, лучшая C _{dyn} при ВКД. Равная эффективность в оксигенации	Хотя ВКД снижает AP _{mean} , нет различий в оксигенации между ВКД-ГО и ВКО-РС	ВКД-РС уменьшает физиологическое «мертвое» пространство в сравнении с другими режимами

* — статистически значимые различия $T_{иск} - T_{макс/мин}$ в пределах одной группы пациентов;

— статистически значимые различия между группами пациентов в пределах одной временной точки сравнения.

Данные представлены как среднее ± стандартное отношение или медиана (межквартильный интервал).

¹ Критерии: PaO₂/FiO₂ < 300 мм рт. ст., двусторонние легочные инфильтраты (по данным рентгенографии) без клинических признаков повышения давления в левом предсердии.

² По данным компьютерной томографии.

ВКД — вентиляция с контролем по давлению; ВКД-ГО — вентиляция с контролем по давлению и гарантированным дыхательным объемом; ВКД(О)-РС — вентиляция с контролем по давлению (объему) и реверсным соотношением времени вдоха ко времени выдоха;

тях, таких как баротравма, пневмоторакс и вентилятор-ассоциированное повреждение легких. Также сочетание крутого ПТр, пневмоперитонеума низкого давления и опыта хирурга позволяет безопасно выполнять РАРП.

Режимы искусственной вентиляции легких

В последние годы были исследованы несколько режимов ИВЛ, направленных на улучшение дыхательной механики и газообмена у пациентов во время РАРП. Вентиляция с контролем по объему широко используется при общей анестезии, но повышает давление в дыхательных путях при пневмоперитонеуме и ПТр. С другой стороны, ВКД не только снижает AP_{peak}, но и улучшает артериальную оксигенацию у пациентов с риском баротравмы вследствие острого респираторного дистресс-синдрома или однологочной вентиляции легких, поскольку обеспечивает больший начальный поток и лучшее альвеолярное распределение [42, 44]. Ранее было показано, что при лапароскопических операциях ВКД была лучшим режимом по сравнению с ВКО за счет лучшей дыхательной механики [45]. Вентиляция с контролем по давлению и гарантированным дыхательным объемом является вариантом вентиляции легких с регулированием по давлению и контролем по объему и может обеспечить постоянный дыхательный объем с постоянным давлением на вдохе и нисходящей кривой потока. В лапароскопической хирургии ВКД-ГО может быть рекомендована для поддержания достаточного дыхательного объема и оксигенации против увеличения давления в дыхательных

путях в условиях ПТр и пневмоперитонеума. Поэтому есть необходимость исследовать эффекты ВКД-ГО, которая сочетает в себе преимущества ВКО и ВКД на оксигенацию и механику дыхания в робот-ассистированной хирургии.

Преимущество ВКД над ВКО в условиях 30° ПТр и пневмоперитонеума было в увеличении C_{dyn} и снижении AP_{peak}, но не AP_{mean}, которое, по мнению авторов, является отражением рекрутмента коллабированных альвеол и перераспределения легочного кровотока и, таким образом, является важнейшей клинической детерминантой газообмена при вентиляции с положительным давлением [22].

Более низкое AP_{peak} и лучшая C_{dyn} в условиях пневмоперитонеума и ПТр при одном и том же дыхательном объеме были принципиальным открытием в группе пациентов с ВКД. При этом оба режима вентиляции были одинаково эффективными с точки зрения оксигенации по параметрам PaO₂ и SpO₂ [23].

Сравнение влияния двух режимов ИВЛ — ВКД-ГО и ВКО-РС — на дыхательную механику, газообмен и гемодинамику после наложения пневмоперитонеума и ПТр показало, что, хотя AP_{mean} было ниже при первом режиме ИВЛ, не было никаких различий в дыхательной механике, газообмене и гемодинамике независимо от используемого режима ИВЛ [24].

Таким образом, было проведено несколько исследований эффективности и безопасности ИВЛ при РАРП, и ВКД была найдена в качестве подходящего режима. Режим ВКД генерирует постоянный поток на вдохе, что теоретически приводит к более равномерному распределению дыхательного объема, облегчая рекрутмент недостаточно вентилируемых легочных сегментов и улучшая оксигенацию. Хотя разница минимальная, ВКД — более

Южная Корея, 2018 [26]	Южная Корея, 2015 [27]	Южная Корея, 2016 [28]	Южная Корея, 2017 [29]	Япония, 2019 [30]
Субсегментарные ателектазы у 12,5 % пациентов	Не было SpO ₂ < 95 % или APpeak > 40 см вод. ст.	Острое повреждение легких ¹ у 18,3 % пациентов	SpO ₂ < 95 %, ателектазы ² у 35,3 % пациентов	Не было периперационных осложнений
Нет различий в оксигенации и концентрации углекислого газа, Cdup или гемодинамике	Отношение 1:1 ассоциировано с меньшим APpeak, без гемодинамической нестабильности. Нет различий в оксигенации	PaO ₂ выше без гемодинамических нарушений в группе MR. Нет различий в Cdup	Маневр рекрутмента предотвращает легочные осложнения и управляет интраоперационной оксигенацией	Маневр рекрутмента эффективен в улучшении податливости легких и устранении ателектазов

ВКО — вентиляция с контролем по объему; ДО — дыхательный объем; ИБС — ишемическая болезнь сердца; ИМТ — индекс массы тела; ИП — инспираторная пауза; МПфиз — физиологическое «мертвое» пространство; MR — маневр рекрутмента; НД — нет данных; ОРЗ — острое респираторное заболевание; ФВЛЖ — фракция выброса левого желудочка; ХОБЛ — хроническая обструктивная болезнь легких; ЦВД — центральное венозное давление; ЧД — частота дыханий; APmean — среднее давление в дыхательных путях; APpeak — пиковое давление в дыхательных путях; APplat — давление плато в дыхательных путях; ASA — Американское общество анестезиологов; Cdup — динамическая податливость респираторной системы; EtCO₂ — парциальное давление конечно-экспираторного углекислого газа; I:E ratio — соотношение времени вдоха ко времени выдоха; FiO₂ — фракция вдыхаемого кислорода; *n* — количество пациентов; PaCO₂ — парциальное давление углекислого газа в артериальной крови; PaO₂ — парциальное давление кислорода в артериальной крови; PEEP — положительное конечно-экспираторное давление; SpO₂ — насыщение крови кислородом.

эффективный режим ИВЛ по сравнению с ВКО в снижении инспираторного давления в дыхательных путях, но его влияние на улучшение оксигенации ограничено. Этому есть следующее объяснение. Оба режима ИВЛ производят высокое среднее давление в дыхательных путях, и в отсутствие рекрутмента сжатие внутриальвеолярных сосудов во время принудительного вдоха скорее увеличивает внутрилегочный шунт.

Инверсия отношения времени вдоха ко времени выдоха

ИВЛ с длительным вдохом стала альтернативным режимом для улучшения газообмена и механики дыхания не только у пациентов с острым респираторным дистресс-синдромом, но также у хирургических пациентов со сниженной податливостью легких [46, 47]. Напротив, этот метод может привести к снижению сердечного выброса из-за повышения внутригрудного давления, что уменьшает венозный возврат [48], поэтому метод должен применяться осторожно, особенно у пожилых людей со значительной индивидуальной изменчивостью и ограниченными физиологическими резервами. Тем не менее в настоящее время отсутствует информация о соответствующем I:E ratio при РАРП.

Режим ВКД с индивидуально подобранной инверсией I:E ratio в пределах от 1:1 до 2:1 на фоне РЕЕР 4 см вод. ст. значительно уменьшал МПфиз по сравнению с режимом ИВЛ с обычным дыхательным циклом у пациентов со здоровыми легкими [25].

В рандомизированном перекрестном исследовании было изучено, может ли I:E ratio 1:1 против 1:2 смягчить

нарушения газообмена, включая гиперкапнию, в условиях пневмоперитонеума и ПТр. Наблюдались значительное снижение PaO₂ и увеличение PaCO₂ в группе стандартного I:E ratio 1:2, однако эффект вентиляции с равным I:E ratio дольше, чем один час, еще предстоит определить [26].

С другой стороны, I:E ratio 1:1 было связано со значительным снижением APpeak по сравнению с I:E ratio 1:2 без гемодинамической нестабильности во время пневмоперитонеума в крутом ПТр. Тем не менее не было существенной разницы между группами пациентов по PaO₂, что не поддерживает использование данного режима в улучшении оксигенации [27].

Таким образом, ИВЛ с удлиненным I:E ratio может быть полезна для улучшения оксигенации и уменьшения давления в дыхательных путях после наложения пневмоперитонеума по сравнению с обычным I:E ratio 1:2. Потенциальные механизмы улучшения оксигенации при ИВЛ с длительным I:E ratio — это улучшение внутрилегочного распределения вдыхаемого воздуха из-за более медленного инспираторного потока и внутреннего РЕЕР из-за короткого времени выдоха. Учитывая потенциальные осложнения ИВЛ с пролонгированным I:E ratio во время РАРП, следует детально рассмотреть риски и преимущества в зависимости от состояния пациента и хирургической ситуации.

Положительное давление в конце выдоха и маневры рекрутмента

В нескольких клинических исследованиях были изучены дыхательные и гемодинамические эффекты РЕЕР

во время длительного пневмоперитонеума. Применение РЕЕР 5 или 10 см вод. ст. сохраняло артериальную оксигенацию во время пневмоперитонеума и ПТр [49, 50]. Однако пациенты с раком предстательной железы — обычно пожилые люди и часто имеют сердечно-сосудистые заболевания и дыхательную дисфункцию. РЕЕР увеличивает внутригрудное давление, тем самым уменьшая пред- и постнагрузку левого желудочка, в том числе у пациентов с кардиомиопатией [51]. Поэтому очень важно определить уровень РЕЕР, который обеспечивает максимальное влияние на транспорт кислорода и минимизирует сердечно-легочные побочные эффекты РАРП. Недавние клинические исследования показали, что ИВЛ с использованием РЕЕР и маневра рекрутмента может улучшить артериальную оксигенацию и легочную податливость и уменьшить фракцию легочного шунта [52, 53]. Тем не менее отсутствуют доказательства влияния МР на легочную функцию и клинические исходы хирургических пациентов со здоровыми легкими, кому проводилась интраоперационная протективная ИВЛ при более высоком РЕЕР [54, 55].

Было изучено влияние длительного пневмоперитонеума на оксигенацию и гемодинамику при вентиляции легких РЕЕР 5 см вод. ст. и без него (РЕЕР 0 см вод. ст.). Применение РЕЕР привело к значительно более высоким значениям PaO_2 через 3 и 4 ч пневмоперитонеума, но после десуффляции значения оксигенации артериальной крови снизились значительно ниже значений до инсуффляции. Таким образом, применение РЕЕР 5 см вод. ст. сохраняет приемлемую оксигенацию при длительном пневмоперитонеуме [38].

Было показано, что механика дыхания и оксигенация пациентов улучшаются вместе с оптимизацией РЕЕР. Уровень РЕЕР 7 см вод. ст. был оптимальным, поскольку происходило улучшение оксигенации без чрезмерного повышения AP_{peak} [39].

В рандомизированном контролируемом исследовании оценивали влияние МР при давлении 40 см вод. ст. в течение 40 секунд на системную оксигенацию и податливость легких при уровне РЕЕР 15 см вод. ст. Отмечалось, что PaO_2 было значительно выше без гемодинамических нарушений, однако это благоприятное влияние на оксигенацию длилось недолго, так же как не было различий по другим дыхательным переменным, включая динамическую и статическую податливость легких [28].

По сравнению с только РЕЕР, МР возрастающим давлением 4–6–8–16 см вод. ст. на фоне РЕЕР имел потенциал в качестве метода управления интраоперационной оксигенацией и позволял предотвратить легочные осложнения в периоперационном периоде [29].

В небольшом рандомизированном клиническом исследовании были оценены эффекты МР при давлении 30 см вод. ст. длительностью 30 секунд на системную оксигенацию и податливость легких. Основным выводом было то, что стратегия «открытого легкого» эффектив-

на в улучшении податливости легких и что только РЕЕР 5 см вод. ст. может быть недостаточно для устранения ателектаза [30].

Таким образом, ИВЛ с РЕЕР ассоциируется с улучшением оксигенации и податливости легких без излишнего возрастания давления в дыхательных путях или сердечно-сосудистой дисфункции. Кроме того, несмотря на кратковременный эффект, маневры рекрутмента недостаточно вентилируемых участков легких во время длительного ПТр и пневмоперитонеума, по-видимому, уменьшают альвеолярное «мертвое» пространство и улучшают газообмен, и этому может способствовать замедление инспираторного потока. Эти эффекты РЕЕР и МР могут улучшить клинические исходы после РАРП.

Выводы

1. Основные факторы риска периоперационных нарушений механики дыхания и оксигенации при РАРП — пневмоперитонеум и крутое ПТр, которые проявляются особенно значимо при индексе массы тела $> 30 \text{ кг/м}^2$.
2. Ни в одном из исследований не была доказана эффективность какого-либо режима ИВЛ для профилактики нарушений газообмена при РАРП.
3. Использование маневра рекрутмента и повышение положительного конечно-экспираторного давления до 5–10 см вод. ст. улучшает оксигенацию, но не улучшает послеоперационную дыхательную функцию легких.
4. Представленные данные обеспечивают лишь пилотную оценку доказательств эффективности различных режимов и параметров ИВЛ при РАРП и свидетельствуют о целесообразности дальнейших исследований с более длительным периодом наблюдения и массивом данных для определения клинической эффективности и безопасности общей анестезии при РАРП.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ORCID авторов

Лутфарахманов И.И. — 0000-0002-5829-5054

Мельникова И.А. — 0000-0002-4427-4439

Сырчин Е.Ю. — 0000-0002-0027-6491

Асадуллин В.Ф. — 0000-0002-8741-5940

Корелов Ю.А. — 0000-0003-1524-5628

Миронов П.И. — 0000-0002-9016-9461

Литература/References

- [1] Siegel R., Ma J., Zou Z., Jemal A. Cancer statistics, 2018. *CA Cancer J Clin.* 2018; 68(1): 7–30. DOI: 10.3322/caac.21442
- [2] Каприн А.Д., Старински В.В., Петрова Г.В. Состояние онкологической помощи населению России в 2017 году. М.: МНИОИ им. П.А. Герцена — филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России; 2018: 236 с.
[Kaprin A.D., Starinski V.V., Petrova G.V. Status of cancer care to the population of Russia in 2017. Moscow: P. Hertsen MORI — branch of the FSBI NMRRС MH RF; 2018: 236 p. (in Russ)]
- [3] Yonekura H., Hirate H., Sobue K. Comparison of anesthetic management and outcomes of robot-assisted vs pure laparoscopic radical prostatectomy. *J Clin Anesth.* 2016; 35: 281–286. DOI: 10.1016/j.jclinane.2016.08.014
- [4] Hu J.C., Nelson R.A., Wilson T.G., et al. Perioperative Complications of Laparoscopic and Robotic Assisted Laparoscopic Radical Prostatectomy. *J Urol.* 2006; 175(20): 541–546. DOI: 10.1016/s0022-5347(05)00156-4
- [5] Coelho R.F., Palmer K.J., Rocco B., et al. Early Complication Rates in a Single-Surgeon Series of 2500 Robotic-Assisted Radical Prostatectomies: Report Applying a Standardized Grading System. *Eur Urol.* 2010; 57(6): 945–952. DOI: 10.1016/j.eururo.2010.02.001
- [6] Lebeau T., Roupret M., Ferhi K., et al. Assessing the complications of laparoscopic robot-assisted surgery: the case of radical prostatectomy. *Surg Endosc.* 2011; 25(2): 536–542. DOI: 10.1007/s00464-010-1210-z
- [7] Weber E., Colyer M., Lesser R., Subramanian P. Posterior Ischemic Optic Neuropathy After Minimally Invasive Prostatectomy. *J Neuro Ophthalmol.* 2007; 27(4): 285–287. DOI: 10.1097/wno.0b013e31815b9f67
- [8] Awad H., Santilli S., Ohr M., et al. The Effects of Steep Trendelenburg Positioning on Intraocular Pressure During Robotic Radical Prostatectomy. *Anesth Analg.* 2009; 109(2): 473–438. DOI: 10.1213/ane.0b013e3181a9098f
- [9] Bozkirli F., Bedirli N., Akçabay M. Effects of steep Trendelenburg position and pneumoperitoneum on middle ear pressure in patients undergoing robotic radical prostatectomy. *Turk J Med Sci.* 2017; 47(1): 295–299. DOI: 10.3906/sag-1601-113
- [10] Patel V.R., Palmer K.J., Coughlin G., Samavedi S. Robot-assisted laparoscopic radical prostatectomy: perioperative outcomes of 1500 cases. *J Endourol.* 2008; 22(10): 2299–2305. DOI: 10.1089/end.2008.9711
- [11] Tooher R., Swindle P., Woo H., et al. Laparoscopic radical prostatectomy for localized prostate cancer: a systematic review of comparative studies. *J Urol.* 2006; 175(6): 2011–2017. DOI: 10.1016/s0022-5347(06)00265-5
- [12] Phong S.V., Koh L.K. Anaesthesia for robotic-assisted radical prostatectomy: considerations for laparoscopy in the Trendelenburg position. *Anaesth Intensive Care.* 2007; 35(2): 281–285. DOI: 10.1177/0310057x0703500221
- [13] Rewari V., Ramachandran R. Prolonged steep Trendelenburg position: risk of postoperative upper airway obstruction. *J Robot Surg.* 2013; 7(4): 405–406. DOI: 10.1007/s11701-013-0407-2
- [14] Hong J.Y., Kim W.O., Kil H.K. Detection of subclinical CO2 embolism by transesophageal echocardiography during laparoscopic radical prostatectomy. *Urology.* 2010; 75(3): 581–584. DOI: 10.1016/j.urology.2009.04.064
- [15] Thompson J. Myocardial infarction and subsequent death in a patient undergoing robotic prostatectomy. *AANA J.* 2009; 77(5): 365–371.
- [16] Hong J.Y., Oh Y.J., Rha K.H., et al. Pulmonary edema after da Vinci-assisted laparoscopic radical prostatectomy: a case report. *J Clin Anesth.* 2010; 22(5): 370–372. DOI: 10.1016/j.jclinane.2009.05.010
- [17] Kadono Y., Yaegashi H., Machioka K., et al. Cardiovascular and respiratory effects of the degree of head-down angle during robot-assisted laparoscopic radical prostatectomy. *Int J Med Robot.* 2013; 9(1): 17–22. DOI: 10.1002/rcs.1482
- [18] Choi D.K., Lee I.G., Hwang J.H. Arterial to end-tidal carbon dioxide pressure gradient increases with age in the steep Trendelenburg position with pneumoperitoneum. *Korean J Anesthesiol.* 2012; 63(3): 209–215. DOI: 10.4097/kjae.2012.63.3.209
- [19] Meininger D., Zwissler B., Byhahn C., et al. Impact of overweight and pneumoperitoneum on hemodynamics and oxygenation during prolonged laparoscopic surgery. *World J Surg.* 2006; 30(4): 520–526. DOI: 10.1007/s00268-005-0133-7
- [20] Lebowitz P., Yedlin A., Hakimi A.A., et al. Respiratory gas exchange during robotic-assisted laparoscopic radical prostatectomy. *J Clin Anesth.* 2015; 27(6): 470–475. DOI: 10.1016/j.jclinane.2015.06.001
- [21] Blecha S., Harth M., Zeman F., et al. The impact of obesity on pulmonary deterioration in patients undergoing robotic-assisted laparoscopic prostatectomy. *J Clin Monit Comput.* 2019; 33: 133–143. DOI: 10.1007/s00268-018-0142-3
- [22] Choi E.M., Na S., Choi S.H., et al. Comparison of volume-controlled and pressure-controlled ventilation in steep Trendelenburg position for robot-assisted laparoscopic radical prostatectomy. *J Clin Anesth.* 2011; 23(3): 183–188. DOI: 10.1016/j.jclinane.2010.08.006
- [23] Jaju R., Jaju P.B., Dubey M., et al. Comparison of volume controlled ventilation and pressure controlled ventilation in patients undergoing robot-assisted pelvic surgeries: An open-label trial. *Indian J Anaesth.* 2017; 61(1): 17–23. DOI: 10.4103/0019-5049.198406
- [24] Kim M.S., Soh S., Kim S.Y., et al. Comparisons of Pressure-controlled Ventilation with Volume Guarantee and Volume-controlled 1:1 Equal Ratio Ventilation on Oxygenation and Respiratory Mechanics during Robot-assisted Laparoscopic Radical Prostatectomy: a Randomized-controlled Trial. *Int J Med Sci.* 2018; 15(13): 1522–1529. DOI: 10.7150/ijms.28442
- [25] Hirabayashi G., Ogihara Y., Tsukakoshi S., et al. Effect of pressure-controlled inverse ratio ventilation on dead space during robot-assisted laparoscopic radical prostatectomy: A randomised crossover study of three different ventilator modes. *Eur J Anaesthesiol.* 2018; 35(4): 307–14. DOI: 10.1097/eja.0000000000000732

- [26] Hur M., Park S.K., Jung D.E. et al. Effect of prolonged inspiratory time on gas exchange during robot-assisted laparoscopic urologic surgery. *Anaesthesist*. 2018; 67(11): 859–867. DOI: 10.1007/s00101-018-0486-6
- [27] Kim M.S., Kim N.Y., Lee K.Y., et al. The impact of two different inspiratory to expiratory ratios (1:1 and 1:2) on respiratory mechanics and oxygenation during volume-controlled ventilation in robot-assisted laparoscopic radical prostatectomy: a randomized controlled trial. *Can J Anaesth*. 2015; 62(9): 979–987. DOI: 10.1007/s12630-015-0383-2
- [28] Ahn S., Byun S.H., Chang H., et al. Effect of recruitment maneuver on arterial oxygenation in patients undergoing robot-assisted laparoscopic prostatectomy with intraoperative 15 cm H₂O positive end expiratory pressure. *Korean J Anesthesiol*. 2016; 69(6): 592–598. DOI: 10.4097/kjae.2016.69.6.592
- [29] Choi E.S., Oh A.Y., In C.B., et al. Effects of recruitment manoeuvre on perioperative pulmonary complications in patients undergoing robotic assisted radical prostatectomy: A randomised single-blinded trial. *PLoS ONE* 2017; 12(9): e0183311. DOI: 10.1371/journal.pone.0183311
- [30] Kudoh O., Satoh D., Hori N., et al. The effects of a recruitment manoeuvre with positive end-expiratory pressure on lung compliance in patients undergoing robot-assisted laparoscopic radical prostatectomy. *J Clin Monit Comput*. 2019. DOI: 10.1007/s10877-019-00306-y
- [31] Lee J.Y., Lee J.Y., Hong S.J., et al. The Risk Factors of Postoperative Respiratory Insufficiency after Prolonged Robotic Radical Prostatectomy. *Korean J Crit Care Med*. 2010; 25(3): 130–135. DOI: 10.4266/kjccm.2010.25.3.130
- [32] Schrijvers D., Mottrie A., Traen K., et al. Pulmonary gas exchange is well preserved during robot assisted surgery in steep Trendelenburg position. *Acta Anaesthesiologica Belgica*. 2009; 60: 229–233.
- [33] Kalmar A.F., Foubert L., Hendrickx J.F.A., et al. Influence of steep Trendelenburg position and CO₂ pneumoperitoneum on cardiovascular, cerebrovascular, and respiratory homeostasis during robotic prostatectomy. *Br J Anaesth*. 2010; 104(4): 433–439. DOI: 10.1093/bja/aeq018
- [34] Kilic O.F., Börgers A., Köhne W., et al. Effects of steep Trendelenburg position for robotic-assisted prostatectomies on intra- and extrathoracic airways in patients with or without chronic obstructive pulmonary disease. *Br J Anaesth*. 2015; 114(1): 70–76. DOI: 10.1093/bja/aeu322
- [35] Trembach N., Zabolotskikh I. The pathophysiology of complications after laparoscopic colorectal surgery: Role of baroreflex and chemoreflex impairment // *Pathophysiology*. 2019; 26(2): 115–120. DOI: 10.1016/j.pathophys.2019.05.004
- [36] Kakde A.S., Wagh H.D. An observational study: Effects of tenting of the abdominal wall on peak airway pressure in robotic radical prostatectomy surgery. *Saudi J Anaesth*. 2017; 11(3): 279–282. DOI: 10.4103/sja.sja_560_16
- [37] La Falce S., Novara G., Gandaglia G., et al. Low Pressure Robot-assisted Radical Prostatectomy With the AirSeal System at OLV Hospital: Results From a Prospective Study. *Clin Genitourin Cancer*. 2017; 15(6): 1029–1037. DOI: 10.1016/j.clgc.2017.05.027
- [38] Meiningner D., Byhahn C., Mierdl S., et al. Positive end-expiratory pressure improves arterial oxygenation during prolonged pneumoperitoneum. *Acta Anaesthesiol Scand*. 2005; 49(6): 778–83. DOI: 10.1111/j.1399-6576.2005.00713.x
- [39] Lee H.J., Kim K.S., Jeong J.S., et al. Optimal positive end-expiratory pressure during robot-assisted laparoscopic radical prostatectomy. *Korean J Anesthesiol*. 2013; 65(3): 244–250. DOI: 10.4097/kjae.2013.65.3.244
- [40] Казаков А.С., Колонтарев К.Б., Пушкарь Д.Ю., Пасечник И.Н. Анестезиологическое обеспечение робот-ассистированной радикальной простатэктомии. *Хирургия. Журнал им. Н.И. Пирогова*. 2015; 2: 56–62. DOI: 10.17116/hirurgia2015256–62
- [Kazakov A.S., Kolontarev K.B., Pushkar` D.I., Pasechnik I.N. Anesthetic management of robot-assisted radical prostatectomy. *Khirurgiia (Mosk)*. 2015; (2): 56–62. (in Russ)]
- [41] Goodale R.L., Beebe D.S., McNeven M.P., et al. Hemodynamic, respiratory, and metabolic effects of laparoscopic cholecystectomy. *Am J Surg*. 1993; 166(5): 533–537. DOI: 10.1016/s0002-9610(05)81148-1
- [42] Al-Saady N., Bennett E.D. Decelerating inspiratory flow waveform improves lung mechanics and gas exchange in patients on intermittent positive-pressure ventilation. *Intensive Care Med*. 1985; 11(2): 68–75. DOI: 10.1007/bf00254777
- [43] Tuğrul M., Camci E., Karadeniz H., et al. Comparison of volume controlled with pressure controlled ventilation during one-lung anaesthesia. *Br J Anaesth*. 1997; 79(3): 306–310. DOI: 10.1093/bja/79.3.306
- [44] Prella M., Feihl F., Domenighetti G. Effects of short-term pressure-controlled ventilation on gas exchange, airway pressures, and gas distribution in patients with acute lung injury / ARDS: comparison with volume-controlled ventilation. *Chest*. 2002; 122(4): 1382–1388. DOI: 10.1378/chest.122.4.1382
- [45] Wang J.P., Wang H.B., Liu Y.J., et al. Comparison of pressure and volume-controlled ventilation in laparoscopic surgery: A meta-analysis of randomized controlled trial. *Clin Invest Med*. 2015; 38(3): E119–E141. DOI: 10.25011/cim.v38i3.22707
- [46] Kim W.H., Hahm T.S., Kim J.A., et al. Prolonged inspiratory time produces better gas exchange in patients undergoing laparoscopic surgery: a randomised trial. *Acta Anaesthesiol Scand*. 2013; 57(5): 613–622. DOI: 10.1111/aas.12104
- [47] Sinha M., Chiplonkar S., Ghanshani R. Pressure-controlled inverse ratio ventilation using laryngeal mask airway in gynecological laparoscopy. *J Anaesthesiol Clin Pharmacol*. 2012; 28(3): 330–333. DOI: 10.4103/0970–9185.98327
- [48] Kim S.H., Choi Y.S., Lee J.G., et al. Effects of a 1:1 inspiratory to expiratory ratio on respiratory mechanics and oxygenation during one-lung ventilation in the lateral decubitus position. *Anaesth Intensive Care*. 2012; 40(6): 1016–1022. DOI: 10.1177/0310057X1204000613
- [49] Maracajá-Neto L.F., Verçosa N., Roncally A.C., et al. Beneficial effects of high positive end-expiratory pressure in lung respiratory mechanics during laparoscopic surgery. *Acta Anaesthesiol Scand* 2009; 53(2): 210–217. DOI: 10.1111/j.1399-6576.2008.01826.x

- [50] *Hazebroek E.J., Haitzma J.J., Lachmann B., Bonjer H.J.* Mechanical ventilation with positive end-expiratory pressure preserves arterial oxygenation during prolonged pneumoperitoneum. *Surg Endosc.* 2002; 16(4): 685–689. DOI: 10.1007/s00464-001-8174-y
- [51] *Fellahi J.L., Valtier B., Beauchet A., et al.* Does positive end-expiratory pressure ventilation improve left ventricular function? A comparative study by transesophageal echocardiography in cardiac and noncardiac patients. *Chest.* 1998; 114(2): 556–562. DOI: 10.1378/chest.114.2.556
- [52] *Hartland B.L., Newell T.J., Damico N.* Alveolar recruitment maneuvers under general anesthesia: a systematic review of the literature. *Respir Care.* 2015; 60(4): 609–620. DOI: 10.4187/respcare.03488
- [53] *Spadaro S., Karbing D.S., Mauri T., et al.* Effect of positive end-expiratory pressure on pulmonary shunt and dynamic compliance during abdominal surgery. *Br J Anaesth.* 2016; 116(6): 855–861. DOI: 10.1093/bja/aew123
- [54] *Goldenberg N.M., Steinberg B.E., Lee W.L., et al.* Lung-protective ventilation in the operating room: time to implement? *Anesthesiology.* 2014; 121(1): 184–188. DOI: 10.1097/ALN.0000000000000274
- [55] *Serpa Neto A., Schultz M.J., Gama de Abreu M.* Intraoperative ventilation strategies to prevent postoperative pulmonary complications: Systematic review, meta-analysis, and trial sequential analysis. *Best Pract Res Clin Anaesthesiol.* 2015; 29(3): 331–340. DOI: 10.1016/j.bpa.2015.09.002