

Применение лазерного оптико-акустического течеискателя для контроля герметичности легочных и трахеобронхиальных швов

В.А. Капитанов¹, Е.Б. Топольницкий^{2,3}, Ю.Н. Пономарев^{1*}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

²ОГАУЗ Томская областная клиническая больница
634063, г. Томск, ул. И. Черных, 96

³ГОУ ВПО Сибирский государственный медицинский университет
634050, г. Томск, Московский тракт, 2

Поступила в редакцию 20.03.2013 г.

Предложена и апробирована в модельных и экспериментальных исследованиях на животных простая и эффективная методика контроля пневмостаза дыхательной системы в условиях искусственной вентиляции легких (ИВЛ) с применением лазерного оптико-акустического течеискателя «LaserGasTest». Используемый для работы течеискателя газ-маркер — гексафторид серы представляет собой инертный и биологически безвредный газ, относящийся к 4-му классу опасности, а его концентрация в дыхательной смеси ИВЛ не превышает ПДК для воздуха рабочей зоны производных помещений 5000 мг/м³ (0,077%). Предложенная методика обеспечивает высокоточное определение местоположения и размера дефекта дыхательной системы в реальном масштабе времени.

Ключевые слова: дыхательная система, герметичность хирургического шва, гексафторид серы, лазерный оптико-акустический течеискатель; respiratory system, leak tightness of surgical suture, sulfur hexafluoride, laser photoacoustic leak detector.

Введение

Одним из необходимых условий успешного выздоровления после хирургических вмешательств на органах дыхания является достижение надежного предотвращения утечки воздуха из легочных и трахеобронхиальных швов. Это связано с тем, что более высокий уровень физической герметичности шва сопровождается наименьшей частотой бронхоплевральных осложнений, которые значительно снижают медицинскую и социальную реабилитацию больного в послеоперационном периоде [1]. Однако, несмотря на технологический прогресс, даже в специализированных хирургических центрах контроль пневмостаза (герметичности сшивания ткани легкого или культы бронха) осуществляется несовершенными методами.

Наиболее часто контроль пневмостаза шва достигается путем создания повышенного давления в дыхательных путях после выполнения основного этапа операции. При этом о недостаточной герметичности легочной ткани в области линии резекции

или культы бронха судят по выделению воздуха с характерным звуком через дефекты. При наличии в зоне шва крови происходит ее разбрызгивание струей воздуха.

Также применяется способ контроля пневмостаза путем введения некоторого количества физиологического раствора в плевральную полость и погружения культы бронха или участка легочной ткани под слой жидкости [2].

При повышении давления в дыхательных путях в местах расположения течи (микродефектах) формируются пузырьки, проходящие через слой жидкости.

В патенте [3] предложен способ контроля пневмостаза в торакальной хирургии, включающий обработку линии шва марлевым тупфером, смоченным избыточным количеством 1%-го раствора йодоната с последующим повышением давления в дыхательной системе больного и выявлением дефекта в месте его локализации по наличию воздушных пузырьков.

Существенными недостатками вышеперечисленных методов являются низкая информативность и точность, обусловленные субъективностью оценки врачом местоположения и интенсивности утечки воздуха или газонаркозной смеси через имеющийся дефект. Кроме того, для визуализации дефекта на легочной

* Венедикт Андреевич Капитанов (venedikt@iao.ru); Евгений Богданович Топольницкий; Юрий Николаевич Пономарев (yuron@iao.ru).

ткани в операционной ране необходимыми условиями являются дополнительное повышение давления в легких и либо погружение обследуемой области под слой жидкости, либо нанесение на рану «индикаторного средства» (1%-го раствора йодоната), что неприменимо для пациентов с аллергическими реакциями на препараты йода.

Кроме того, после обнаружения места утечки необходимы удаление жидкости для устранения дефекта (дополнительного наложения швов, клеевой обработки и т.д.), а затем повторная проверка герметичности под слоем жидкости, что трудоемко и увеличивает продолжительность хирургического вмешательства. Существует вероятность поступления жидкости из плевральной полости в трахеобронхиальное дерево при дыхательных экскурсиях. Это может привести к обструкции дыхательных путей вплоть до асфиксии, а также способствует развитию послеоперационной аспирационной пневмонии.

Таким образом, имеющиеся в арсенале хирурга методы контроля пневмостаза недостаточно эффективны, что требует поиска новых решений, отличающихся простотой исполнения, более высокой информативностью и чувствительностью. Представляется перспективным применить для контроля пневмостаза легких приборы и методики, разработанные в научной практике.

Для определения герметичности различного рода объектов широко применяются течеискатели, принцип действия которых основан на регистрации различными физическими методами утечки газов-маркеров через микротрещины или швы.

В качестве газов-маркеров в основном используются гелий и различные галогены, которые требуют либо дорогостоящего оборудования (гелиевые течеискатели), либо они токсичны и не могут быть использованы для контроля герметичности бронхолегочной системы по медицинским показаниям. В работах [4–7] предложено использовать в качестве газа-маркера гексафторид серы. Макет лазерного оптико-акустического течеискателя (ЛОАТ) гексафторида серы был разработан специалистами Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН и Института лазерной физики СО РАН и испытан при определении места и уровня развития дефектов электрооборудования [8]. В настоящее время ЛОАТ «LaserGasTest» выпускается ООО «Специальные технологии» малой серией и проходит процедуру включения в Госреестр средств измерений [9]. Гексафторид серы представляет собой инертный и биологически безвредный газ, относящийся к 4-му классу опасности [10], и уже нашел применение в медицине для улучшения ультразвуковой визуализации сосудов [11].

В настоящей статье предложена методика применения ЛОАТ «LaserGasTest» для контроля герметичности дыхательной системы. Представлены результаты апробации методики в лабораторных исследованиях, моделирующих дыхательную систему в режиме искусственной вентиляции легких, и в экспериментах на животных.

Методика контроля герметичности и ее лабораторное тестирование на модели дыхательной системы

При выполнении хирургических вмешательств на органах дыхания, как правило, используется режим искусственной вентиляции легких (ИВЛ) с положительным давлением в конце выдоха (ПДКВ). При этом внутрилегочное давление в течение всего дыхательного цикла превышает атмосферное на 490–1500 Па [12]. Этот режим способствует наилучшему распределению воздуха в легких, уменьшению шунтирования крови в них и снижению альвеолярно-артериальной разницы по кислороду.

С другой стороны, принцип действия ЛОАТ [4–7, 9] основан на исследовании воздуха в районе предполагаемой течи на наличие SF₆. В тестируемый объект подается смесь гексафторида серы с воздухом или азотом при давлении, превышающем атмосферное на 100–2000 Па. Концентрация SF₆ составляет от 0,01 до 0,1%. Из-за перепада давления и при наличии дефекта смесь начинает вытекать из объекта, и течеискатель фиксирует появление молекул SF₆ в прилегающих к дефекту слоях воздуха. Течеискатель оборудован насосом, который прокачивает воздух с газом-маркером из места забора пробы через оптико-акустический детектор.

Вышеприведенные параметры режимов ИВЛ и ЛОАТ [9] позволяют предложить простую и эффективную методику определения места и уровня развития дефектов дыхательной системы.

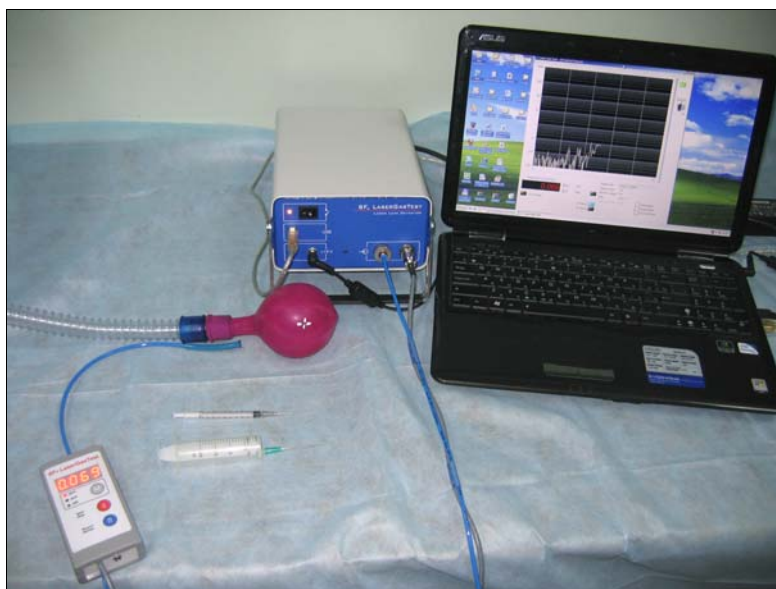
После выполнения основного этапа операции в контур аппарата ИВЛ дополнительно к дыхательной смеси подают гексафторид серы в соотношении, не превышающем ПДК в воздухе рабочей зоны производственных помещений, равную 5000 мг/м³ (0,077%). Герметичность хирургических швов, поверхности легочной ткани, культя бронха, трахеального или бронхиального анастомоза контролируется методом «обнюхивания» лазерным оптико-акустическим течеискателем. При нарушении герметичности в режиме реального времени определяются местоположение и размер дефекта.

Апробация предлагаемой методики была проведена в экспериментах, моделирующих дыхательную систему и нарушение ее герметичности в режиме ИВЛ (рис. 1).

В лабораторных экспериментах аппарат ИВЛ «ФАЗА-5» был подсоединен к резиновому шарик, имитирующему дыхательную систему. Параметры аппарата ИВЛ: объем вентилируемой смеси $5 \cdot 10^{-3}$ м³, пиковое давление 980 Па, частота вентиляции 0,5 Гц. В резиновом шарике иглой 26G (диаметр $0,45 \cdot 10^{-4}$ м) делался прокол, отмеченный крестом. В вентилируемую смесь добавлялся гексафторид серы в объеме $2 \cdot 10^{-6}$ м³, и проводилось обнюхивание течеискателем комнаты и резинового шарика. На рис. 2 показана зависимость концентрации SF₆ в комнате (период времени 1) и в прилегающих к шарик слоях воздуха (периоды времени 2–4). В периоды времени 2 и 4 забор воздуха производился на расстоянии



a



б

Рис. 1. Моделирование методики обнаружения местоположения и интенсивности нарушения герметичности дыхательной системы в режиме ИВЛ: *a* – аппарат ИВЛ «ФАЗА-5»; *б* – ЛОАТ «LaserGasTest» и имитация дыхательной системы (резиновый шарик). Крестом на шарике отмечено место нарушения герметичности (искусственный прокол иглой 26G, диаметр $0,45 \cdot 10^{-4}$ м)

от 0,003 до 0,01 м от места прокола, а в период 3 вблизи от него. Диаметр пробоотборника составлял 0,003 м.

Согласно [13] размер дефекта дыхательной системы можно оценить количеством газа U ($\text{м}^3/\text{с}$), вытекающего из него в единицу времени при разнице давлений $\Delta P = 1$ Па.

Оценим U , принимая во внимание, что лазерный течеискатель измеряет относительную концентрацию c_{SF_6} в измерительной ячейке опико-акустического детектора, суммируя сигнал в течение 1 с. При условии, что все молекулы SF_6 , выходящие из

течи, попадают в ячейку, относительная концентрация определяется соотношением

$$c_{\text{SF}_6} = \frac{N_{\text{SF}_6}}{N_C}. \quad (1)$$

Число молекул SF_6 , выходящих из течи за 1 с, равно

$$N_{\text{SF}_6} = \frac{U \Delta P n}{kT}, \quad (2)$$

где ΔP – превышение давления, создаваемое аппаратом ИВЛ, Па; n – относительная концентрация SF_6

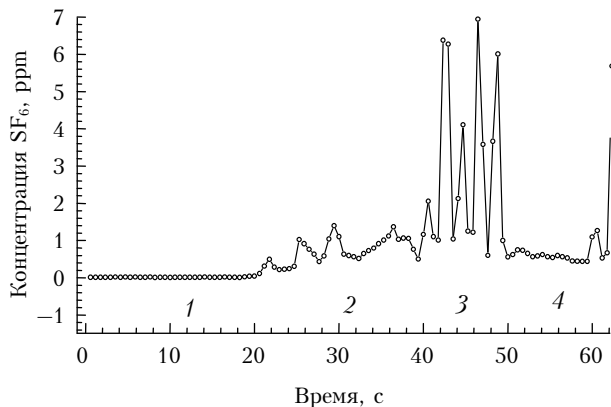


Рис. 2. Концентрация SF₆ в комнате и прилегающих к шаррику слоях воздуха в зависимости от времени и места забора пробы. Период 1 — забор воздуха из комнаты; 2, 4 — на расстоянии до прокола от 0,003 до 0,01 м; 3 — забор пробы из места прокола

в дыхательной системе; k — постоянная Больцмана, Дж/К; T — температура дыхательной смеси, К.

Общее число молекул, прокачиваемых через измерительную ячейку за 1 с, найдем по формуле

$$N_C = \frac{S_p P}{kT}, \quad (3)$$

где S_p — производительность насоса (скорость прокачки воздуха через измерительную ячейку), м³/с; P — давление воздуха, Па. Исходя из формул (1)–(3), количество газа U , вытекающего из дефекта, можно оценить из соотношения

$$U = \frac{c_{SF_6} S_p P}{\Delta P n}. \quad (4)$$

Размер дефекта, обусловленного проколом шаррика иглой 26G, при скорости прокачки воздуха лазерным теченскателем $S_p = 1 \cdot 10^{-5}$ м³/с составил $U = 1,8 \cdot 10^{-5}$ м³/с, или $U = 1,55$ м³/сут.

ЛОАТ «LaserGasTest» оборудован системой звуковой индикации (повышение частоты звука при увеличении концентрации SF₆), что позволяет в режиме реального времени локализовать местоположение и размер дефекта.

Результаты лабораторных экспериментов показали перспективность предложенной методики обнаружения местоположения и интенсивности пневмостаза легких в режиме ИВЛ. Погрешность локализации дефекта составила 0,003 м и зависит от диаметра пробоотборника.

Тестирование методики определения места и размера дефектов дыхательной системы в экспериментах на животных

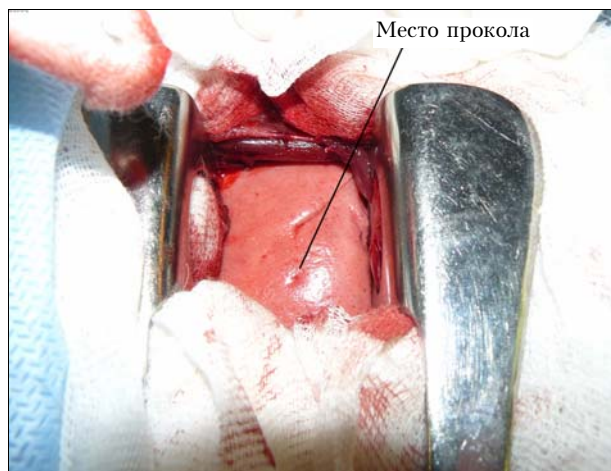
Экспериментальная часть исследования выполнена на беспородной собаке с массой тела примерно 10 кг. По анатомическому строению, функции и фи-

зиологии дыхательные системы собаки и человека наиболее подобны, поэтому собаки часто используются в экспериментальной хирургии. Исследование проводилось согласно этическим принципам, изложенным в «Европейской конвенции по защите позвоночных животных, используемых для экспериментальных и других научных целей» и одобренных этическим комитетом ГОУ ВПО «Сибирский государственный университет» г. Томска. Эксперименты проводились под общей анестезией на условиях ИВЛ. В дыхательный контур при осуществлении ИВЛ в воздушную смесь добавляли гексафторид серы с концентрацией порядка 0,001–0,07%, и проводили измерения концентрации SF₆ в воздухе операционной и вблизи дыхательного контура ИВЛ и животного.

Под внутривенным пропофоловым наркозом с управляемым дыханием выполнялась торакотомия слева, в краниальной, сердечной и диафрагмальной долях легкого инъекционной иглой 26G ($0,45 \cdot 10^{-4}$ м), предназначенной для введения инсулина, создавался дефект висцеральной плевры (рис. 3).



а

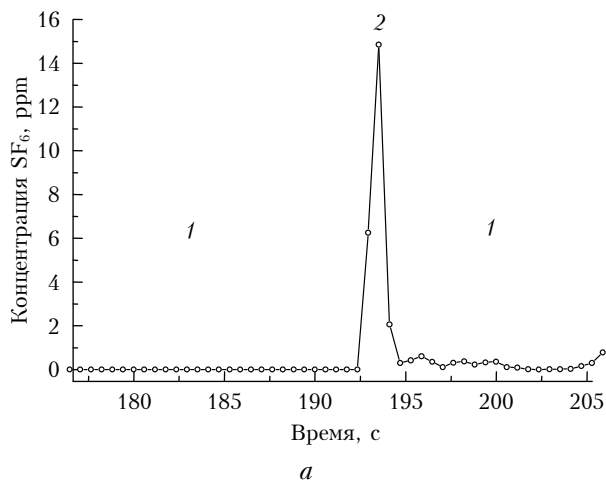


б

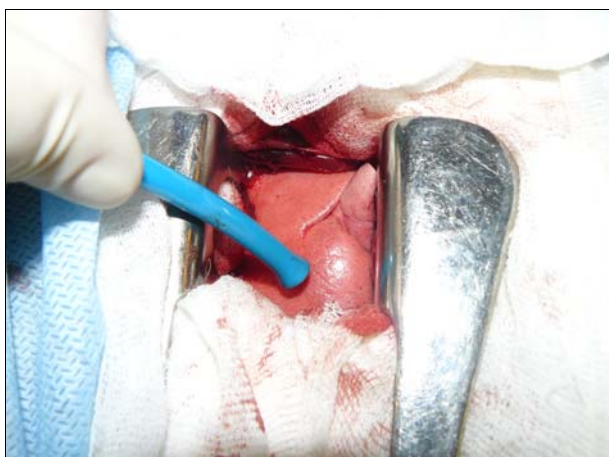
Рис. 3. Моделирование дефекта висцеральной плевры животного: а — прокол инъекционной иглой 26G ($0,45 \cdot 10^{-4}$ м); б — местоположение дефекта

В дальнейшем местоположение дефекта и интенсивность утечки регистрировали согласно описанной выше методике.

На рис. 4, а показана зависимость концентрации SF₆ в воздухе от времени и положения места



б



в

Рис. 4. Зависимость концентрации SF₆ в воздухе от времени и положения места забор пробы (а); забор пробы производится на расстоянии от 0,005 до 0,05 м от дефекта (период времени 1) (б); забор пробы производится вблизи дефекта (период времени 2) (в)

забора пробы. В период времени 1 забор воздуха производился на расстоянии от 0,005 до 0,05 м от места дефекта (рис. 4, б), а в период 2 вблизи него (рис. 4, в).

Заключение

Предложена и апробирована в модельных и экспериментальных исследованиях на животных простая и эффективная методика контроля пневмостаза бронхолегочной системы в условиях ИВЛ с применением лазерного оптико-акустического теческателья «LaserGasTest».

Используемый для работы теческателья газ-маркер (гексафторид серы) представляет собой инертный и биологически безвредный газ, относящийся к 4-му классу опасности, а его концентрация в дыхательной смеси ИВЛ не превышает ПДК для воздуха рабочей зоны производственных помещений 5000 мг/м³ (0,077%).

Наличие в ЛОАТ «LaserGasTest» системы звуковой индикации (повышение частоты и интенсивности звука при увеличении концентрации SF₆) позволяет в режиме реального времени локализовать местоположение и размер дефекта с неопределенностью местоположения порядка 0,003 м.

Авторы выражают благодарность профессору Н.А. Кривовой и кандидату медицинских наук Н.А. Шеферу за помощь при проведении экспериментов на животных.

1. Колесников И.С. Резекция легких. Л.: Медгиз, 1960. 303 с.
2. Бежан Л., Зитти Е.Гр. Резекции легких. Анатомические основы и хирургическая методика / Пер. Я. Анненкова. Бухарест: Изд-во Академии Социал. Республики Румынии, 1981. 164 с.
3. Способ контроля пневмостаза в торакальной хирургии: Пат. 2238681. Россия, МПК⁷ А 61 В 17/00. Ю.С. Сидоренко, С.А. Зинькович. Заявлено 21.04.2003; Опубл. 27.10.2004.
4. Шерстов И.В., Капитанов В.А., Агеев Б.Г., Карпузииков А.И., Пономарев Ю.Н. Лазерный оптико-акустический теческатель // Оптика атмосф. и океана. 2004. Т. 17, № 2–3. С. 119–123.
5. Карпузииков А.И., Шерстов И.В., Агеев Б.Г., Капитанов В.А., Пономарев Ю.Н. Лазерные сенсоры-газоанализаторы на основе интеллектуальных волноводных СО₂-лазеров и резонансных оптико-акустических детекторов и их приложения // Оптика атмосф. и океана. 2007. Т. 20, № 5. С. 453–458.
6. Chang-Myunng Lee, Vyckov K.V., Kapitanov V.A., Karapuzikov A.I., Ponomarev Yu.N., Sherstov I.V., Vasiliev V.A. High-sensitivity laser photo-acoustic leak detector // Opt. Eng. 2007. V. 46, N 6. P. 064302.
7. Осипов К.Ю., Капитанов В.А. Моделирование оптико-акустического анализатора SF₆ в атмосферном воздухе с частотной модуляцией излучения теплового источника // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 9. С. 810–814.
8. Долин А.П., Карпузииков А.И., Ковалькова Ю.А. Эффективность использования лазерного теческателья элегаза «Карат» для определения места и уровня развития дефектов электрооборудования // Электро. 2009. № 6. С. 25–28.

9. URL: http://www.detectors.lc-solutions.com/p1_r.php
10. URL: http://elegas.ru/elegaz_opt.html
11. *Контрастное* вещество для ультразвуковой визуализации: Пат. 2344833. США. МПК7 А 61 К 49/22. Р. Валович, Г. Берстейн, Д.Е. Чикеринг, Д. Страуб. Заявлено 04.06.2004; Оpubл. 27.01.2009. Приоритет 04.06.2004.
12. URL: <http://www.upz.ru/medicinskaya-texnika/1-narkozno-dyxatelnoe-oborudovanie/9-apparat-iskusstvennoj-ventilyaczii-legkix-aventa.html>
13. *Путко А.И., Плисковский В.Я., Пенчко Е.А.* Конструирование и расчет вакуумных систем. М.: Энергия, 1979. 504 с.

V.A. Kapitanov, E.B. Topol'nitskiy, Yu.N. Ponomarev. **Application of the laser photoacoustic leak detector for tightness control of lung and tracheobronchial sutures.**

The simple and effective method (technique) of the leakage test of the respiratory system using medical ventilation apparatus and laser photoacoustic leak detector "LaserGasTest" was suggested. The technique was tested in model experiments and experiments on animals. Sulfur hexafluoride is inert and biologically harmless gas and its concentration in medical ventilation apparatus does not exceed 5000 mg/m^3 (0.077%). The proposed technique provides precise location and size of leakage.