

Е.Б. Топольницкий^{1,2}, В.А. Капитанов³, Ю.Н. Пономарев³, Н.А. Шефер¹, Н.А. Кривова⁴

ОЦЕНКА АЭРОГЕРМЕТИЧНОСТИ В ТОРАКАЛЬНОЙ ХИРУРГИИ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ ОПТИКО-АКУСТИЧЕСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

¹ ОГАУЗ «Томская областная клиническая больница» (Томск)

² ГБОУ ВПО «Сибирский государственный медицинский университет» Минздрава России (Томск)

³ ФГБУН Институт оптики атмосферы СО РАН (Томск)

⁴ НИИ биологии и биофизики Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск)

Предложена и апробирована в эксперименте на животных простая и эффективная методика контроля пневмостаза в торакальной хирургии 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 газонаркозной смеси при искусственной вентиляции легких не превышает предельно допустимые концентрации для воздуха рабочей зоны производных помещений 5000 мг/м³ (0,077 %). Предложенная технология обеспечивает высокоточное определение местоположения и размера дефекта дыхательной системы в режиме реального времени.

Ключевые слова: торакальная хирургия, аэрогерметичность шва, гексафторид серы, лазерный оптико-акустический течеискатель

AIR-TIGHTNESS EVALUATION IN THORACIC SURGERY WITH USE OF LASER OPTICAL-ACOUSTIC SPECTROSCOPY

Е.Б. Topolnitskiy^{1,2}, V.A. Kapitanov³, Yu.N. Ponomarev³, N.A. Shefer¹, N.A. Krivova⁴

¹ Tomsk Regional Clinical Hospital, Tomsk

² Siberian State Medical University, Tomsk

³ Institute of Atmospheric Optics SB RAMS, Tomsk

⁴ Scientific Research Institute of Biology and Biophysics of Tomsk State University, Tomsk

The simple and effective method of the leakage test in thoracic surgery using laser photo-acoustic leak detector «Laser-GasTest» was suggested and tested in experiment on mongrels. Sulfur hexafluoride used for the work of leak detector is an inert and biologically harmless gas of the 4th class of danger and its concentration in medical ventilation apparatus does not exceed 5000 mg/m³ (0.077 %). The proposed technique provides real-time high-frequency determination of location and size of leakage.

Key words: thoracic surgery, airtightness suture, sulfur hexafluoride, laser optical-acoustic leak detector

При хирургических вмешательствах на трахеобронхиальном дереве и легочной ткани закономерно стремление хирургов достигнуть более высокого уровня аэрогерметичности швов. Это связано с тем, что более высокий уровень физической герметичности шва сопровождается наименьшей частотой бронхоплевральных осложнений, которые значительно замедляют медицинскую и социальную реабилитацию больного в послеоперационном периоде [5, 6].

В литературе описано несколько способов контроля пневмостаза в торакальной хирургии. Однако наиболее часто герметичность легочных или трахеобронхиальных швов, культя долевого или главного бронхов определяют путем погружения проверяемой области под слой жидкости с последующим повышением давления газонаркозной смеси в трахеобронхиальном дереве до 30 см водн. ст. [1, 6]. Признаком недостаточной герметичности является формирование в имеющихся дефектах швов воздушных пузырьков, проходящих через слой жидкости в плевральной полости. Недостатком способа является трудность визуализации дефекта в операционной ране и возможность только

ориентировочно судить об интенсивности утечки воздуха. Кроме того, после обнаружения места утечки необходимо 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. Также возможно поступление 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 торакального хирурга методы контроля пневмостаза недостаточно эффективны, что требует поиска новых решений, отличающихся простотой исполнения, более высокой информативностью и чувствительностью.

В технической литературе подробно описаны методы определения герметичности различного рода объектов при помощи газоанализаторов-течеискателей, принцип действия которых основан на регистрации различными физическими методами

утечки газов-маркеров через микротрещины или швы. Представляется перспективным использовать для контроля герметичности швов в торакальной хирургии приборы и методики, разработанные в научной практике и промышленности. В качестве газов-маркеров в основном используется гелий и различные галогены, которые требуют дорогостоящего оборудования (гелиевые течеискатели), либо газы-маркеры токсичны и не могут быть использованы для контроля герметичности бронхолегочной системы по медицинским показаниям.

В настоящей работе предложена технология интраоперационного контроля герметичности культи бронха, легочных и трахеобронхиальных швов при помощи лазерного оптико-акустического течеискателя (ЛОАТ) и индикаторного средства – гексафторида серы (SF_6), представлены результаты ее апробации при стендовых испытаниях, моделирующих дыхательную систему в режиме искусственной вентиляции легких (ИВЛ) и при хирургических вмешательствах в эксперименте на животных.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В качестве газа-маркера нами выбран SF_6 , который представляет собой инертный и биологически безвредный газ, относящийся к 4-му классу опасности и уже применяемый в медицине [8]. Поиск утечки газа из мест дефектов культи бронха, легочных и трахеобронхиальных швов осуществлялся ЛОАТ «LaserGasTest», разработанным Институтом оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН и Институтом лазерной физики СО РАН. В настоящее время ЛОАТ «LaserGasTest» выпускается ООО «Специальные технологии» малой серией и проходит процедуру включения в Государственный реестр средств измерений [9]. Областью применения ЛОАТ является определение локализации и интенсивности утечек SF_6 в электрооборудовании [2, 7].

Хирургические вмешательства на органах дыхания, как правило, проводятся в условиях ИВЛ с положительным давлением в конце выдоха (ПДКВ). При этом внутрилегочное давление в течение всего дыхательного цикла превышает атмосферное на 490–1500 Па [3, 5]. 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 основан на исследовании воздуха в районе предполагаемой течи на наличие SF_6 [2, 7]. В тестируемый объект подается смесь SF_6 с воздухом или азотом при давлении, превышающем атмосферное на 100–2000 Па. Концентрация SF_6 составляет от 0,01 до 0,1 %. Из-за перепада давления при наличии дефекта смесь начинает вытекать из объекта, и течеискатель фиксирует появление молекул SF_6 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 позволяют предложить простую и эффективную

методику определения локализации и размера дефекта дыхательной системы.

Выполнена серия опытов на 4 беспородных собаках обоего пола массой тела 10–16 кг. Эксперименты на животных проводились согласно этическим принципам, изложенным в «Европейской конвенции по защите позвоночных животных, используемых для экспериментальных и других научных целей» (Страсбург, 1986). Все манипуляции и выведение животных из опытов проводили под общей анестезией. Исследование одобрено этическим комитетом ГБОУ ВПО «Сибирский государственный медицинский университет» Минздрава России. Животные получены и операции на них выполнены в НИИ биологии и биофизики (Томск). Под общей анестезией с управляемым дыханием моделировали дефект легочной ткани, культи бронха после лобэктомии и пневмоэктомии, трахеотрахеального анастомоза на уровне шейного отдела трахеи и определяли аэрогерметичность швов по разработанной технологии.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Оригинальная технология контроля пневмостаза при операциях в торакальной хирургии заключается в следующем (решение о выдаче патента РФ на изобретение от 26.03.13 по заявке № 2011137596). После выполнения основного этапа операции в дыхательный контур аппарата ИВЛ дополнительно к газонаркозной смеси подают гексафторид серы в соотношении, не превышающем предельно-допустимую концентрацию (ПДК) в воздухе рабочей зоны производных помещений 5000 мг/м^3 (0,077 %). Аэрогерметичность хирургических швов, поверхности легочной ткани, культи бронха, бронхиального или трахеального анастомоза контролируется методом обнюхивания диагностическим зондом ЛОАТ. В случаях нарушения их герметичности в режиме реального времени определяется местоположение, а по интенсивности утечки газа-маркера судят о размере дефекта.

Разработанную технологию предварительно апробировали на стендовых испытаниях на модели дыхательной системы в режиме ИВЛ. В лабораторных экспериментах аппарат ИВЛ «ФАЗА 5» (Россия) был подсоединен к резиновому шарикю, имитирующему дыхательную систему (рис. 1). Параметры аппарата ИВЛ таковы: объем вентилируемой смеси – $5 \times 10^{-3} \text{ м}^3$, пиковое давление – 980 Па, частота вентиляции – 0,5 Гц. В резиновом шарикю иглой 26G (диаметр $0,45 \times 10^{-4} \text{ м}$), предназначенной для введения инсулина, делался прокол, отмеченный крестом. В вентилируемую смесь добавлялся SF_6 в объеме $2 \times 10^{-6} \text{ м}^3$ и проводилось обнюхивание течеискателем комнаты и резинового шарика. На рисунке 2 показана зависимость концентрации SF_6 в комнате (период времени 1) и в прилегающих к шарикю слоях воздуха (периоды времени 2–4). В период времени 2 и 4 забор воздуха производился на расстоянии от 0,003 до 0,01 м от места прокола, а в период 3 – вблизи от него. Диаметр пробоотборника составлял 0,003 м.

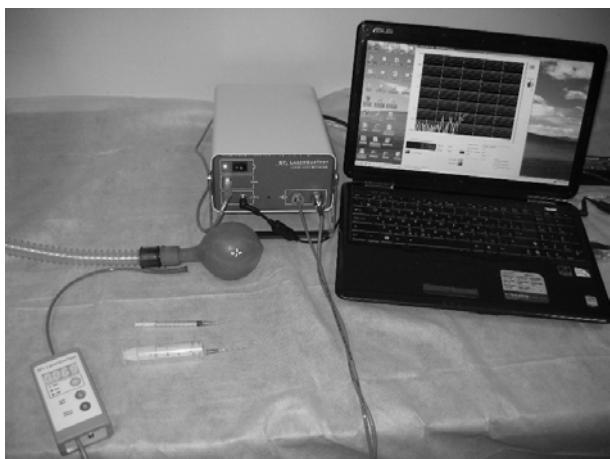


Рис. 1. Моделирование методики обнаружения местоположения и интенсивности нарушения герметичности дыхательной системы в режиме ИВЛ. ЛОАТ «LaserGasTest» и имитация дыхательной системы (резиновый шарик). Крестом на шарике отмечено место нарушения герметичности (искусственный прокол иглой 26G).

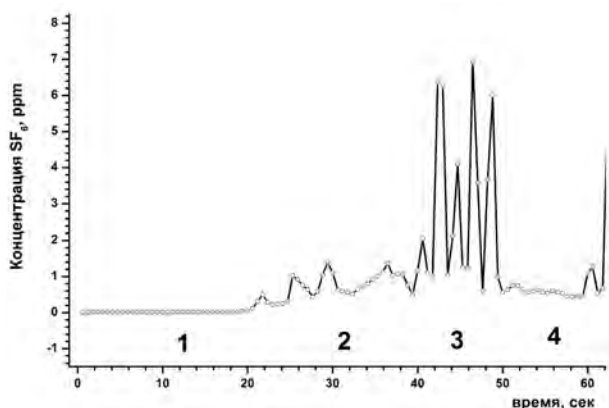


Рис. 2. Концентрация SF₆ в комнате и прилегающих к шарiku слоях воздуха в зависимости от времени и места забора пробы: 1 – забор воздуха из комнаты; 2, 4 – на расстоянии до прокола от 0,003 до 0,01 м; 3 – забор пробы из места прокола.

Согласно А.И. Пипко с соавт. [4], размер дефекта дыхательной системы можно оценить количеством газа U ($\text{м}^3 \times \text{сек}^{-1}$), вытекающего из него в единицу времени при разнице давлений $\Delta P = 1$ Па.

Оценим U , принимая во внимания то, что лазерный течеискатель измеряет относительную концентрацию c_{SF_6} в измерительной ячейке опико-акустического детектора, суммируя сигнал в течение одной секунды. При условии, что все молекулы SF₆ выходящие из течи попадают в ячейку, относительная концентрация определяется соотношением:

$$c_{SF_6} = \frac{N_{SF_6}}{N_C} \quad (1).$$

Число молекул SF₆, выходящих из течи за одну секунду, равно:

$$N_{SF_6} = \frac{U \times \Delta P \times n}{k \times T} \quad (2),$$

где: ΔP – превышение давления, создаваемое аппаратом ИВЛ (Па); n – относительная концентрация SF₆

в дыхательной системе; k – постоянная Больцмана (Дж/К); T – температура дыхательной смеси (К).
Общее число молекул, прокачиваемых через измерительную ячейку за одну секунду, равно:

$$N_C = \frac{S_p \times P}{k \times T} \quad (3),$$

где: S_p – производительность насоса (скорость прокачки воздуха через измерительную ячейку) ($\text{м}^3 \times \text{сек}^{-1}$); P – давление воздуха (Па).

Исходя из формул 1–3, количество газа U , вытекающего из дефекта, можно оценить из соотношения:

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

Размер дефекта, обусловленного проколом шарика иглой 26G, при скорости прокачки воздуха лазерным течеискателем $S_p = 1 \times 10^{-5} \text{ м}^3 \times \text{сек}^{-1}$ составил $U = 1,8 \times 10^{-5} \text{ м}^3 \times \text{сек}^{-1}$ или $1,55 \text{ м}^3 \times \text{сутки}^{-1}$.

ЛОАТ «LaserGasTest» оборудован системой звуковой индикации (повышение частоты и интенсивности звука при увеличении концентрации SF₆), что позволяет тем самым в режиме реального времени определить местоположение и размер дефекта. Результаты стендовых испытаний показали перспективность предложенной методики обнаружения местоположения дефекта и качества пневмостаза в дыхательной системе в условиях ИВЛ. При этом погрешность локализации дефекта составила 0,003 м и зависела от диаметра пробоотборника.

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

В качестве подопытных животных были выбраны собаки, поскольку в физиологическом отношении их дыхательная система подобна таковой у человека. Под внутривенным пропофоловым наркозом с управляемым дыханием выполнялась торакотомия слева, в диафрагмальной доле легкого инъекционной иглой 26G ($0,45 \times 10^{-4}$ м), предназначенной для введения инсулина, создавался дефект висцеральной плевры. В дыхательный контур при осуществлении ИВЛ в воздушную смесь добавляли SF₆ с концентрацией порядка 0,001–0,07 % и проводили измерения концентрации SF₆ в воздухе операционной и вблизи дыхательного контура ИВЛ и животного. В дальнейшем местоположение дефекта и интенсивность утечки регистрировали, согласно описанной выше методике. На рисунке 3 показана зависимость концентрации SF₆ в воздухе от времени и положения места забора пробы. В период времени 1 забор воздуха производился на расстоянии от 0,005 до 0,05 м от места дефекта, а в период 2 – вблизи от него. Затем осуществляли лобэктомия, завершающую пневмонэктомию, соответственно определяли герметичность культы долевого или главного бронха. Одному животному выполнили цервикотомию, циркулярную резекцию трахеи с межтрахеальным анастомозом. Далее по описанной выше технологии

проводили контроль пневмостаза при помощи ЛОАТ «LaserGasTest» и индикаторного средства – SF₆.

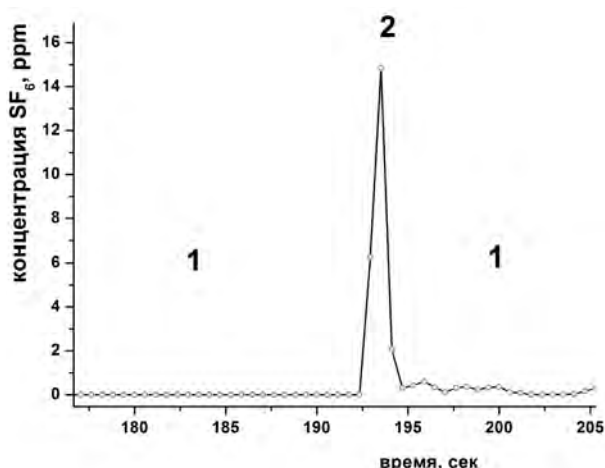


Рис. 3. Зависимость концентрации SF₆ в воздухе от времени и положения места забора пробы: 1 – забор пробы производится на расстоянии от 0,005 до 0,05 м от дефекта; 2 – забор пробы производится вблизи дефекта.

Во всех случаях, основываясь на звуковой индикации течеискателя и мониторинге концентрации SF₆ с использованием компьютера, удалось во время операции в режиме реального времени просто и с высокой точностью локализовать дефект, а также судить о его размере.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе предложена и апробирована при стендовых испытаниях и в эксперименте на животных простая и эффективная методика контроля пневмостаза в торакальной хирургии с применением ЛОАТ «LaserGasTest». Используемый

для работы течеискателя газ-маркер – гексафторид серы – представляет собой инертный и биологически безвредный газ, а его концентрация в дыхательной смеси ИВЛ не превышает ПДК для воздуха рабочей зоны производных помещений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бежан Л. Резекции легких. Анатомические основы и хирургическая методика. – 1981. – 416 с.
2. Долин А.П., Карапузиков А.И., Ковалькова Ю.А. Эффективность использования лазерного течеискателя элегаза «Карат» для определения места и уровня развития дефектов электрооборудования // Электро. – 2009. – № 6. – С. 25–28.
3. Кассиль В.Л., Выжигина М.А., Лескин Г.С. Искусственная и вспомогательная вентиляция легких. – М.: Медицина, 2004. – 480 с.
4. Пипко А.И., Плисковский В.Я., Пенчко Е.А. Конструирование и расчет вакуумных систем. – М.: Энергия, 1979. – 504 с.
5. Торакальная хирургия: Руководство для врачей / Под ред. Л.Н. Бисенкова. – СПб.: ЭЛБИ-СПб, 2004. – 928 с.
6. Хирургия легких и плевры: Руководство для врачей / Под ред. И.С. Колесникова, М.И. Лыткина. – Л.: Медицина, 1988. – 560 с.
7. Шерстов И.В., Капитанов В.А., Агеев Б.Г. и др. Лазерный оптико-акустический течеискатель // Оптика атмосферы и океана. – 2004. – Т. 17, № 2–3. – С. 119–123.
8. Элегаз. Свойства [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://elegaz.ru/elegaz_opt.html.
9. SF₆ LaserGasTest – система для поиска утечек элегаза (SF₆) в высоковольтной коммутационной аппаратуре с элегазовой изоляцией [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.detectors.lc-solutions.com/p1_r.php.

Сведения об авторах

Топольницкий Евгений Богданович – кандидат медицинских наук, заведующий хирургическим торакальным отделением ОГАУЗ «Томская областная клиническая больница» (634063, г. Томск, ул. И. Черных, 96; тел.: 8 (3822) 64-61-93; e-mail: e_topolnitskiy@mail.ru)

Капитанов Венедикт Андреевич – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории лазерной спектроскопии ФГБУН Институт оптики атмосферы СО РАН (634021, г. Томск, пл. Академика Зюева, 1)

Пономарев Юрий Николаевич – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией лазерной спектроскопии ФГБУН Институт оптики атмосферы СО РАН

Шефер Николай Анатольевич – кандидат медицинских наук, врач-торакальный хирург ОГАУЗ «Томская областная клиническая больница» (e-mail: schefer@sibmail.com)

Кривова Наталья Андреевна – доктор биологических наук, профессор, директор НИИ биологии и биофизики Национального исследовательского Томского государственного университета