

УДК 681.02

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ И РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК ДЫХАНИЯ

С.И. Ханков, А.Ю. Кормилицын, В.И. Скорубский

Рассматривается теплофизическая модель энергетического обмена воздушных потоков вдоха и выдоха, которая использует свойства турбулентности. Показано, что на основе этой модели могут быть построены датчики измерения и методы расчета параметров потоков, характеризующих объем легких и скорость воздушных потоков. Изменения параметров потока относительно нормальных могут быть связаны с нарушениями работы легких и сердечно-сосудистой системы. Результаты исследований модели легли в основу конструирования датчика параметров вихревых потоков дыхания и алгоритмов расчета параметров в портативных приборах функциональной диагностики.

Ключевые слова: дыхание, мониторинг состояния, турбулентность, аускультация, рекуперация, конвективный теплообмен.

Введение

История измерений параметров дыхания [1] показывает актуальность продолжения этих исследований с целью организации оперативных измерений и диагностики на основе современных компьютерных технологий.

Легкие – воздушный насос (вентилятор) низкого давления. Движение воздуха происходит в результате перепада давления между внутренним объемом легких и атмосферой. В настоящее время получены новые данные о влиянии состояния сердечно-сосудистой системы на дыхание, появились технические возможности его оценки и автоматической обработки получаемых данных с датчиков параметров дыхания. В клинической медицине стандартным способом оценки вентиляции легких является спирометрия. Измеряется объемная скорость воздушного потока и изменения объема [1]. Датчики параметров воздушных потоков могут иметь разные физические принципы детектирования [1, 2]:

1. Манометрический метод – прямое измерение давления воздушного потока при вдохе и выдохе [3].
2. В электромагнитных вихревых расходомерах жидкость, движущаяся в постоянном магнитном поле, создает ЭДС, частота которой прямо пропорциональна частоте вихреобразования.
3. Ультразвуковой метод – вихри усиливаются и достигают своего развития ниже по потоку, где происходит их детектирование. Из анализа амплитудно-модулированного ультразвукового сигнала определяется величина объемного расхода [4].
4. Емкостной датчик регистрирует изменение емкости за счет деформации чувствительного элемента.
5. Метод изгибных напряжений – пьезосенсор регистрирует совокупность тепловых и механических воздействий от вихревых потоков.
6. Термальный – регистрируется динамика изменения температуры с изменением во времени энтальпии воздушного потока, в результате регистрируются вихревые колебания воздушного потока.

Большинство приборов спирометрии построены с использованием датчиков типов 1–5 и применяются как средства измерения при клинической аттестации, а также для проведения кратковременных медицинских проб. Однако эти приборы не пригодны для длительного мониторинга состояния пациента в реальной жизнедеятельности, что необходимо для оперативного контроля состояния, лечения и повышения надежности измерения. Портативность оборудования измерения и анализа параметров дыхания на основе компьютерных средств управления позволяет проводить оперативные измерения в реальном времени и принимать решения на основе быстрой диагностики.

В настоящее время интерес представляют термальные методы, для которых хорошо изучены принципы возникновения вихревых потоков в дыхании и их влияние на измеряемые параметры, связанные с теплообменом. Качество систем автоматической спирометрии определяется комплексом средств и методов, в том числе – качеством датчиков параметров вихревых потоков, алгоритмами анализа сигналов и диагностики, производительностью и ресурсами памяти компьютеров. Термальные методы измерений поддерживаются теорией теплофизических расчетов, одна из ведущих школ в этой области представлена монографией [5].

Целью исследований, представленных в работе, является обоснование методов расчета параметров дыхания на основе измерений датчиками, регистрирующими энергетику теплообмена в реальном времени.

Турбулентность вихревых потоков в легких

С учетом геометрической формы легких показано, что потоки в верхних путях легких являются турбулентными (вихревыми) [1]. Свойства турбулентности для выявления и измерения параметров потоков исследуются как прямыми клиническими измерениями, так и оперативными, косвенными, в частности, акустическими приборами.

Акустические явления в легких широко используются для врачебного обследования пациента (методы аускультации). Аускультация легких производится в определенных точках на поверхности грудной клетки. При дыхании выслушивают везикулярные и бронхиальные шумы. Везикулярные шумы выслушивают над легочной тканью, а бронхиальные – над трахеей и крупными бронхами. В классическом описании нормальные и патологические шумы определяют диаграммами (спектограммы).

Установлено [2], что нормальные звуки генерируются турбулентным потоком в воздушных путях, громкость (энергия колебаний) пропорциональна скорости потока. Аускультация отображает не только процесс генерации звука, но и процессы резонанса и поглощения между воздушными путями и датчиком звуков, что используется для диагностики по изменению спектра сигнала. Регистрация акустических явлений непосредственно в воздушном потоке передает информацию о спектре и энергии процесса генерации звука. Спектр определяется ритмом работы сердца, а энергия – теплообменом воздушного потока.

Вихри образуются на границах тела обтекания (канала на вдохе и выдохе) [2]. При этом частота образования вихрей прямо пропорциональна скорости потока:

$$f = \text{Sh} (v/d), \quad (1)$$

где f – частота образования вихрей Кармана; Sh – число Струхала; v – скорость потока среды; d – ширина тела обтекания.

Начало турбулентного режима течения определяется критерием Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{ud}{\nu}, \quad (2)$$

где u – скорость среды, м/с; ν – коэффициент кинематической вязкости; d – диаметр канала.

При $\text{Re} > 10000$ устанавливается турбулентный режим, для ламинарного режима $\text{Re} < 2300$, в промежуток имеет место переходный режим.

Параметры турбулентных потоков, определяющие энергообменные процессы при дыхании или процессы массообмена, являются необходимым фактором жизнедеятельности и важнейшими показателями изменений состояния сердечно-сосудистой системы. При этом оцениваются отклонения параметров процессов массо- и теплообмена от среднестатистических значений, принимаемых в качестве нормы в клинических исследованиях.

Например, принимаемая диаметр трахеи 1,5 см, объемный расход $W = 5 \text{ л} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ (измеряется датчиком потока) и кинематическую вязкость $\nu = 16 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, получим значение критерия Рейнольдса $\text{Re} = 26500$. В этом случае имеет место турбулентный поток, и при значении критерия Струхала $\text{Sh} = 0,2$ при скорости потока $u = 28,3 \text{ м/с}$, измеряемой датчиком, частота колебаний вихревых потоков определяется из соотношений (1), (2):

$$f = \text{Sh} \frac{u}{d} = 380 \text{ Гц.}$$

Доступные внешнему мониторингу интегральные массо-энергетические параметры воздушных потоков – температура воздушного потока на вдохе T_0 и выдохе T_w ; объемный или массовый расход или скорость воздушного потока M . Выделяемая энергия в выдыхаемом потоке или мощность теплового потока P связаны между собой соотношениями [5]

$$P = cME(T_w - T_0); \quad E = 1 - \exp(-\varphi); \quad \varphi = \frac{\alpha S}{cM}, \quad (3)$$

где E – коэффициент недорекуперации; φ – показатель недорекуперации; α – коэффициент теплоотдачи; S – площадь поверхности теплообмена.

Зависимости справедливы при условии постоянства температуры дыхательных путей. Из этого следует, что:

1. при больших значениях S в формуле (3) имеем $\varphi > 4$, $E \rightarrow 1$ и

$$P = cM(T_w - T_0), \quad (4)$$

происходит полная рекуперация, температура стенки трахеи при вдохе охлаждается до температуры внешнего воздуха;

2. при малых значениях S и φ в формуле (3) $E \rightarrow \varphi$ и

$$E \approx \frac{\alpha S}{cM}, \quad P = \alpha S(T_w - T_0), \quad (5)$$

т.е. имеет место недорекуперация, и необходим расчет коэффициента теплоотдачи α , характеризующего интенсивность конвективного теплообмена.

Определение параметров воздушного потока и интенсивности теплообмена

Расчет коэффициента теплоотдачи проводится с использованием уравнений, содержащих безразмерные критерии подобия. Критерий Рейнольдса (2) определяет скорость потока жидкости или газа (в рассматриваемом случае – воздуха) и может быть выражен через объемный или массовый расход, плотность и (для канала круглого сечения) – диаметр d [5]:

$$Re = \frac{ud}{\nu} = \frac{4M}{\pi d \gamma v} = \frac{4W}{\pi d v}, \quad (6)$$

где γ – плотность воздуха; W – объемный расход воздуха.

В зависимости от величины критерия Рейнольдса вычисляется значение критерия Нуссельта (Nu) [4], который определяет величину коэффициента теплоотдачи α в (5)

$$\alpha = Nu \lambda_f / d,$$

где λ – коэффициент теплопроводности воздуха. В частности, для ламинарного режима ($Re < 2300$) справедлива следующая формула вычисления критерия Нуссельта [6]

$$\overline{Nu}_f = 0,15 \sqrt[3]{Re_f \cdot Pr_f^{0,43} \cdot Gr_f^{0,1}}, \quad (7)$$

где Pr – критерий Прандтля; Gr – критерий Грасгофа.

Индекс f обозначает, что соответствующие коэффициенты определяются при температуре внешнего воздуха, а w – при температуре охлаждаемой или нагреваемой поверхности. Критерий Прандтля вычисляется по формуле

$$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{v c \gamma}{\lambda}.$$

Критерий Грасгофа определяется по формуле

$$Gr = \beta g \frac{d^3}{\nu^2} (T_w - T_f),$$

где β – коэффициент объемного расширения воздуха; g – ускорение силы тяжести; d – внутренний диаметр канала.

Для переходного режима ($Re = 2300-10000$) из формулы (7) следует:

$$\overline{Nu}_f = k \cdot Pr_f^{0,43} = 0,958 k, \quad (8)$$

а для турбулентного режима (Re больше 10000)

$$\overline{Nu}_f = 0,023 \cdot Re_f^{0,8} \cdot Pr_f^{0,43}. \quad (9)$$

Длина теплообменника (трахеи), при которой реализуется условие полной рекуперации, определяется как

$$L \geq 4 \frac{CM}{\alpha l d}; M = \gamma W.$$

Таким образом, для расчета теплоотдачи P :

1. вычисляется значение критерия Рейнольдса (6);
2. определяется коэффициент теплоотдачи α с использованием критерия Нуссельта по одной из формул (8) или (9) в зависимости от величины критерия Рейнольдса;
3. вычисляется коэффициент конвективного массообмена β (м/с)

$$\beta = \frac{\alpha}{c \gamma};$$

4. вычисляется интенсивность конденсации или испарения

$$j = \frac{\beta}{RT} (P_s - P_w), \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}),$$

где $R = 461$ Дж/кг; T – термодинамическая температура; P_s – парциальное давление пара над конденсирующей или испаряющей поверхностью; P_w – давление насыщенных паров, соответствующее температуре конденсирующей или испаряющей поверхности. В случае положительного значения j происходит конденсация с выделением тепловой энергии, а при отрицательном значении – испарение с поглощением энергии;

5. по коэффициенту теплоотдачи α можно определять величину поглощаемой или отдаваемой тепловой мощности.

Расчет энергии воздушного потока

Мощность воздушного потока P рассчитывается на основе тепловых измерений параметров потока датчиком и складывается из мощности, определяемой теплосодержанием P_t и кинетической энергией потока P_k :

$$P = P_t + P_k.$$

Мощность теплосодержания определяется энтальпией газа и вычисляется как

$$P_t = Mi; \quad i = c \Delta T; \quad \Delta T = T_n - T_c; \quad M = \gamma W; \quad (10)$$

где M – массовый расход; i – удельная энтальпия воздуха; c – удельная теплоемкость воздуха; ΔT – температурный напор потока; T_n – температура потока; T_c – температура окружающей среды; γ – плотность воздуха; W – объем расхода. В свою очередь, мощность теплосодержания вычисляется как

$$P_k = MV^2/2; \quad V = W/S, \quad (11)$$

где V – скорость потока; S – проходное сечение в канале потока. Таким образом, можно получить выражение для общей мощности в виде

$$P = M(i + W^2/S).$$

Отсюда следует, что теплосодержание потока растет пропорционально объемному расходу, а кинетическая энергия пропорциональна третьей степени объемного расхода.

Например, подставив в формулы (10) и (11) справочные значения ($c = 10^3$ Дж/кг·К; $\gamma = 1,16$ кг/м³; $\Delta T = 16$ К; $W = 5 \cdot 10^{-3}$ м³; $S = 1,8 \cdot 10^{-4}$ м² и $V = 28,3$ м/с), получим:

$$P_t = 93 \text{ Вт}; \quad P_k = 2,32 \text{ Вт}; \quad P_t/P_k = 40.$$

Таким образом, энергия в выдыхаемом воздушном потоке в 40 раз больше кинетической энергии потока. Тогда амплитуда пульсаций, связанная с воздействием на датчик импульсов отдельных вихрей, будет мала по сравнению с общей амплитудой сигнала. Для выделения этих пульсаций необходимо использовать схемотехнические и алгоритмические средства определения параметров вихревых компонентов сигнала.

Заключение

В работе предложена методика расчета энергии теплообмена в потоке воздуха с использованием параметров дыхания (скорость потока, температура на входе и выходе, объем расхода), измеряемых датчиком воздушного потока. В статье [7] приводятся характеристики разработанного для измерений датчика параметров воздушного потока при вдохе и выдохе и результаты исследования параметров датчика на реальных объектах.

Литература

1. Джорж Уэст. Физиология дыхания. Основы. – М.: Мир. – 1988. – 200 с.
2. Стерлягов А.А. Роль биосистемы легких в теплообмене организма // Математическая морфология: электронный математический и медико-биологический журнал. – 1998. – Т. 3 – № 1. – С. 158–165.
3. ГОСТ 8.563.1-97. Измерение расхода и количества жидкости и газов методом переменного перепада давления. – Введ. 01.10.1999. – Минск: Изд-во стандартов, 1997. – 64 с.
4. ГОСТ 30457-97. Акустика. Определение уровней звуковой мощности источников шума на основе интенсивности звука. Измерение в дискретных точках. Технический метод. – Введ. 01.01.1999. – М.: Изд-во стандартов, 1997. – 14 с.
5. Дульнев Г.Н., Парфенов В.Г., Сигалов А.В. Методы расчета теплового режима приоров. – М.: Радио и связь, 1990. – 312 с.
6. Nabibullo I. Abdussamatov, Sergey I. Khankov, Yevgeniy V. Lapovok. The Thermal Inertia Characteristics of the System Ocean-Atmosphere // Journal of Geographic Information System. – 2012. – V. 4. – № 5. – P. 479–482 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.SciRP.org/journal/jgis>, свободн.
7. Кормилицын А.Ю., Ханков С.И., Скорубский В.И. Измерение параметров дыхания датчиком воздушных потоков // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2013. – № 3. – С. 122–129.

Ханков Сергей Иванович

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, вед. научный сотрудник, Leva0007@rambler.ru

Кормилицын Александр Юрьевич
Скорубский Владимир Иванович

– ООО «Инкарт», технический директор, Alex_kkk@incart.ru
– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент; Государственный политехнический университет, доцент; vskorubski@yandex.ru