

УДК 681.3

Имитационное моделирование дыхательной системы человеческого организма

А. В. Пикуль

Введение

Научно-исследовательская работа биохимиков, гистологов, физиологов ведет к разработке концептуальной модели дыхательной системы организма человека. Однако концептуальная модель не позволяет получать количественных оценок, корректность логических посылок не всегда удастся доказать, поэтому необходимо разрабатывать математические модели, реализовывать их в виде алгоритмов в ЭВМ и затем с помощью имитационного моделирования обосновывать корректность теоретических высказываний.

1. Специфика моделирования физиологических систем организма человека

Дыхательная система человека является сложной, многокомпонентной, пространственно структурированной системой, элементы которой обладают индивидуальностью. При математическом описании дыхательной системы (а также любых других физиологических систем) важен сам факт отображения той или иной функциональной зависимости, существующих в организме. Насколько точно отражена эта связь в математическом отношении, часто не столь важно. Неточности описания связей могут быть устранены в будущем по мере поступления новых данных о физиологических экспериментах, новых сведений о структуре этих связей и их функционировании[1].

2. Особенности процессов дыхания человеческого организма

Дыхание – это совокупность процессов, обеспечивающих непрерывное поступление кислорода к тканям, использование его в окислительных реакциях, а также удаление из организма образующихся в процессе метаболизма углекислого газа и частично воды [2].

Различают несколько этапов дыхания: внешнее дыхание, обеспечивающее газообмен между легкими и внешней средой; газообмена между альвеолярным воздухом и притекающей к легким венозной кровью; транспорт газов кровью; газообмен между артериальной кровью и тканями; тканевое дыхание.

На рис. 1 приведена схема поступления кислорода и вывода углекислого газа в легких и тканях организма человека. Как видно из рисунка при имитационном моделировании процессов дыхания человеческого организма недостаточно ограничиться описанием процессов, происходящих в легких человека. Необходимо также для адекватности имитационной модели реальной дыхательной системе человека описывать еще и процесс переноса кровью кислорода; процесс газообмена во внутренних органах и периферических тканях; процесс вывода углекислого газа из органов и тканей. Все эти процессы определяют отклики имитационной модели.

Параметры и отклики объекта моделирования

Входные параметры модели делятся на:

⇒ параметры, характеризующие условия окружающей среды:

P_{iO_2} – напряжение кислорода во вдыхаемом воздухе,

$PiCO_2$ – напряжение углекислого газа во вдыхаемом воздухе.

⇒ параметры, характеризующие функциональное состояние организма:

w_p – общая интенсивность мышечной деятельности (нагрузка),

w_i – интенсивность деятельности внутренних органов не связанная с утилизацией продуктов обмена.

При любом изменении любого из внешних сигналов во всех компонентах модели начинаются переходные процессы, приводящие к новому равновесному состоянию.

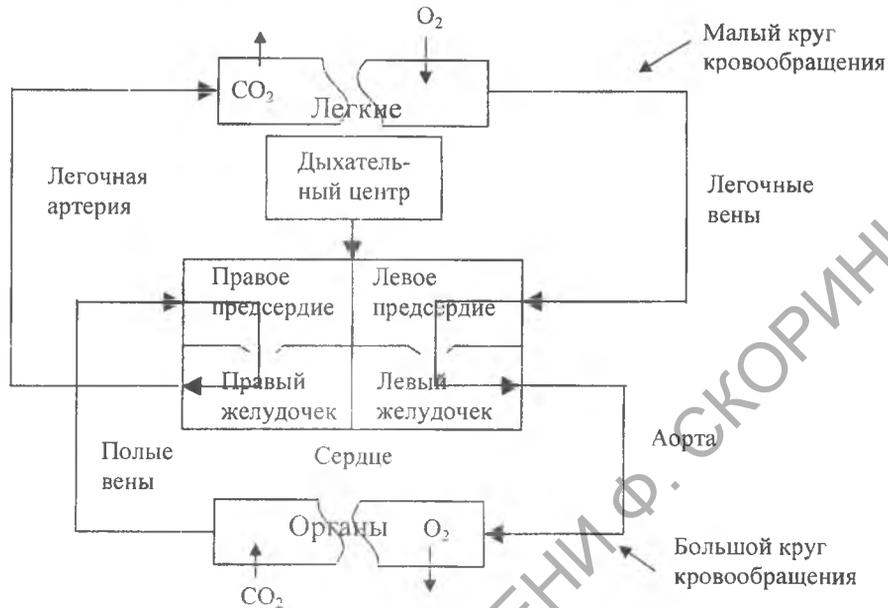


Рис.1 Схема поступления кислорода и вывода углекислого газа в легких и тканях
В качестве откликов модели были выбраны:

1) Коэффициент утилизации кислорода:

$$\alpha_{v} = 0.835 * PaO_2 + 0.306 * ABpO_2 - 0.009 * w_p - 31.4$$

2) Альвеолярная вентиляция: v_a

3) Напряжение кислорода в артериальной крови: PaO_2

4) Напряжение углекислого газа в артериальной крови: $PaCO_2$

где v_a , PaO_2 , $PaCO_2$ находятся из решения системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} v_a = k_1 * [\alpha_v * v_a - ABpO_2 * Q_e] \\ \frac{d}{dt} PaO_2 = \frac{1}{FRC} * v_a * (PiO_2 - PaO_2 - 12) - \frac{PB - 47}{1000 * FRC} * ABpO_2 * Q_e \\ \frac{d}{dt} PaCO_2 = \frac{PB - 47}{1000 * (FRC)} * ABpCO_2 * Q_e - \frac{1}{FRC} * v_a * (PaCO_2 - PiCO_2) \end{cases}$$

5) Артерио-венозная разница кислорода в периферии:

$$ABpO_2 = 0.798 * (PaO_2 - PpO_2) + 0.03 * w_p$$

6) Артерио-венозная разница углекислоты в периферии:

$$ABpCO_2 = 2.54 * (PpCO_2 - PaCO_2) + 0.026 * w_p$$

7) Артерио-венозная разница кислорода во внутренних органах: $ABiO_2 = 47.8 + 0.03 * w_p$

8) Концентрация молочной кислоты в периферии (мышечных тканях): $с_{pm}$

9) Напряжение кислорода в периферических тканях: PpO_2

10) Напряжение углекислоты в периферических тканях: $PpCO_2$

11) Концентрация молочной кислоты во внутренних органах: $с_{am}$

где $с_{pm}$, PpO_2 , $PpCO_2$, $с_{am}$ – находятся из решения следующей системы:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} cpm = k_2 * (121 * w_{p2} - 6.7 * w_{pi} - 28.5 * Q_p * (cpm - cam)) \\ \frac{d}{dt} PpO2 = k_3 * ([0.798 * (PaO2 - PpO2) + 0.03 * w_p] * Q_p - 0.092 * (cpm)^2) \\ \frac{d}{dt} PpCO2 = k_4 * (0.83 * (cpm)^2 - [2.54 * (PpCO2 - PaCO2) + 0.026 * w_p] * Q_p) \\ \frac{d}{dt} cam = k_5 * (28.5 * (cpm - cam) * Q_p - 6.7 * (ABiO2 - wi)) \end{cases}$$

Коэффициенты k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 определяются непосредственно при воспроизведении модели на вычислительной машине с тем, чтобы в выбранном масштабе времени временные характеристики процессов в модели отвечали физиологическим данным.

4. Технология использования имитационной модели дыхательной системы человека

Исследование человека (ЧО) с помощью имитационной модели дыхательной системы (ИМДС) представляет собой многоэтапную итеративную процедуру, обеспечивающую ее верификацию и калибровку под конкретного человека [3].

Этап 1. Осуществляется анкетирование ЧО; обработка этих анкет, записей, хранящихся в истории болезни и результатов лабораторных исследований. В результате в базе данных модели (БДМ) формируется таблица переменных модели дыхательной системы конкретного человека в состоянии покоя и при максимальной физической нагрузке.

Этап 2. Реализует итерационную процедуру верификации и калибровки универсальной ИМ под конкретного человека.

Этап 3. Осуществляется определение воздействий входных параметров на ДС ЧО в привычных для человека условиях жизнедеятельности, которые назовем состоянием покоя.

Этап 4. Имитируется изменение условий окружающей среды и (или) изменение функционального состояния организма для получения откликов модели (смотри п. 3)

Этап 5. Осуществляется сравнение данных имитации на этапах 3 и 4. Результатом этапа 5 является определение воздействия вследствие изменений условий окружающей среды и (или) изменение функционального состояния организма, на основе которого выдаются рекомендации поведения ЧО.

Заключение

Возможности использования моделей физиологических систем в клинических условиях могут быть расширены лишь после появления моделей подобных ИМДС ЧО описанной в этой работе, хорошо разработанных и адекватно воспроизводящих реально протекающие процессы в широком диапазоне функционирования.

Abstract. Principles of simulation of respiratory subsystems of a human organism are considered.

Литература

1. В. И. Шумаков, В. Н. Новосельцев, М. П. Сахаров и др., *Моделирование физиологических систем организма*, Москва, Медицина, 1971.
2. В. Б. Войнов, Н. В. Воронова, В. В. Золотухин, *Методы оценки состояния систем кислородообеспечения организма человека*, Ростов н/Д., 2001.
3. И. В. Максимей, *Имитационное моделирование на ЭВМ*, Москва, Радио и связь, 1988.