

УДК 681.3

## Компьютерное моделирование системы дыхания человеческого организма

А.В.Пикуль

### 1. Актуальность компьютерного моделирования системы дыхания

Использование математических методов исследования в биологии и медицине сводилось в основном к статистической обработке материала, но в последние годы они нашли качественно новое применение в виде математического моделирования биологических процессов в живой природе, в том числе и человека.

Человеческий организм (ЧО), как известно, представляет собой чрезвычайно сложную систему с многочисленными подсистемами, которые изучаются на разных уровнях детализации. С одной стороны, имеется много литературы, в которой рассматриваются различные аспекты функционирования различных органов и подсистем, но слабо прослеживаются связи и взаимодействия между органами. С другой стороны, взаимосвязи и причины появления болезней ЧО рассматриваются разрозненно и специализированно. Такое положение привело к появлению различных школ с противоположным толкованием этих функций и их удельного веса в патологических процессах. Это ставит в сложное положение врачей, которым зачастую и так приходится принимать решения в условиях неопределенности и риска. Для повышения эффективности их работы актуально использование компьютерного моделирования, и уже известны успешные результаты применения в медицине современных информационных технологий. Актуальна также задача изучения влияния на уровень здоровья (УЗ) человека различных факторов окружающей среды, его поведения и характера дыхания.

Больше всего толкований динамики развития процессов в ЧО посвящено системе дыхания (СД). Обилие литературы в научных и популярных изданиях (исследования К.П. Бутейко [1], основные положения восточной медицины, известные традиционные методы диагностики дыхательной системы человека) позволяет формализовать многие стороны взаимодействия органов этой подсистемы друг с другом для моделирования, как нормальной жизнедеятельности подсистемы, так и патологических процессов в органах человека. Это наиболее управляемая волей человека система, влияние и важность воздействия которой на уровень здоровья несомненна. При этом результаты воздействия на нее определяют достаточно быстро и с высокой эффективностью.

В данной работе предложено для изучения функционирования органов конкретного человеческого организма использовать имитационное моделирование процессов дыхания в постоянно действующих условиях его поведения.

### 2. Особенности системы дыхания человеческого организма

Безусловно, ЧО является адаптивной системой с достаточно развитыми иерархическими системами интеллекта его подсистем жизнеобеспечения. В то же время это консервативная система, ибо нельзя ни убрать из ее состава некоторые органы, ни ввести дополнительные без существенного нарушения хотя бы части функций ЧО. Обычно называют консервативными такие системы, для которых невозможно решать задачи оптимального состава компонентов и определения оптимального набора выполняемых ими функций. Если же к этому добавляются способности систем адаптироваться к меняющимся внешним условиям



поведению их элементов на основе интеллектуальных критериев, то становится очевидным, что исследователь изучает живые системы. Назовем такие системы адаптивными консервативными интеллектуальными системами (АКИС) [2]. Таким образом, дыхательная система человека является примером АКИС. Независимо от своей природы и предназначения любая АКИС обладает необходимым набором функций для ее адаптации к динамически меняющимся условиям ее существования и взаимодействия с внешней средой. Поскольку предполагается, что ЧО сконструирован идеальным образом, то при его исследовании речь может идти только о предсказании его поведения в различных условиях.

Сложность функциональных связей компонентов АКИС, а также индивидуальный характер их реагирования на одни и те же воздействия внешней среды определяют необходимость многоплановых исследований АКИС. Существующие методики многофакторного анализа и математические модели позволяют изучать влияние ряда факторов на поведение АКИС. Наиболее эффективными и часто используемыми являются регрессионные модели. Но практика исследования таких АКИС как подсистем жизнеобеспечения ЧО показывает, что точность моделирования и предсказательные способности регрессионных моделей существенно ограничены в силу многофункционального характера поведения подсистем ЧО и сложности динамических связей между компонентами АКИС. Это обстоятельство потребовало увеличения уровня детализации процессов, протекающих в АКИС, и использования имитационных методов исследований. Поскольку имитация алгоритмов поведения компонентов АКИС требует больших затрат ресурсов исследователя, а существующие средства автоматизации имитационного моделирования (ИМ) не обеспечивают необходимого уровня технологии имитационного эксперимента (ИЭ), то актуально создание предметно-ориентированного программно-технологического комплекса имитации (ПТКИ) [3] для автоматизации разработки ИМ АКИС и постановки ИЭ на ЭВМ.

### 3. Реализация имитационной модели системы дыхания в составе ПТКИ

ПТКИ состоит из:

- ⇒ базовой системы моделирования МСИС [4];
- ⇒ библиотеки процедур испытания имитационной модели (Испытание);
- ⇒ набора программ (Технология), реализующих технологическую оболочку имитации, адаптированную под предметную область исследований;
- ⇒ библиотек процедур принятия решений (Решение);
- ⇒ имитационных моделей органов и подсистем ОЧ (Подсистемы);
- ⇒ программ анкетирования и формирования исходной информации (Информация).

Основной частью ПТКИ является универсальная имитационная модель системы дыхания человека (ИМСДЧ). Она состоит из трех типов имитационных подмоделей.

Первый тип подмоделей представляет собой модели органов системы дыхания: носоглотки (НосГл), легких (Легк). Они моделируют процесс дыхания человека (поглощение кислорода и выделение углекислого газа легкими ЧО). В качестве моделей порций воздуха используются транзакты воздуха (ТВ), которые направляются от устройства, имитирующего работу носоглотки, к устройству, имитирующему работу легких, и обратно. Синхронизация этапов обработки транзактов воздуха обеспечивается системой управляющих сигналов, вырабатываемых моделями этих органов.

Второй тип подмоделей включает в себя: модель сердца (Серд) и таких кровеносных сосудов как легочной вены (ЛегВен), легочной артерии (ЛегАрт), артерии (Арт), вены (Вен). Данный набор подмоделей имитирует процесс переноса кислорода ко всем органам человека и вывод из них углекислого газа. Эта группа подмоделей (также как и первая группа) функционирует непрерывно в течение суточного цикла жизни ЧО.

К третьему типу относятся модели подсистем, регулирующих физиологические процессы в организме человека – нервной (Нерв), энергетической (Энер), мышечной (Мышч) и прочих систем (ПрСис). Они обеспечивают информационно-логическую связь всех компо-



нентов ИМСДЧ. Единая информационная база данных (ИБД) этих моделей является частью базы программно-технологического комплекса и служит для имитации процесса обеспечения кровеносной системой организма человека кислородом всех органов и подсистем. При этом проверяется баланс поступления и расходования кислорода; вывода углекислого газа; расхода ресурсов органов ЧО и имитации результатов воздействия оздоровительных процедур.

Переменными ИМСДЧ являются такие многомерные векторы как индивидуальные особенности  $i$ -го органа  $k$ -го типа ( $O_{ik}$ ); статистики моделирования процессов  $k$ -го типа в  $i$ -м органе ( $C_{ik}$ ). Все алгоритмы функционирования  $i$ -го органа под воздействием внешней среды  $j$ -го класса ( $\Phi_{ij}$ ) универсальны. Для адаптации универсальной ИМСДЧ под модель конкретного ОЧ<sub>j</sub> необходима ее калибровка, которая, как правило, следует за верификацией алгоритма имитации в ИМСДЧ. Отметим, что в алгоритмах  $\Phi_{ij}$  учтено наличие патологических и компенсаторных циклов взаимодействия органов и подсистем.

#### 4. Двухуровневая структура ИМСДЧ

Можно выделить две группы факторов, действующих на  $j$ -й орган СД ЧО<sub>i</sub>: косвенного влияния внешних факторов и оздоровительных процедур посредством остальных подсистем ЧО<sub>i</sub>, прямого воздействия внешней среды и оздоровительных процедур. В алгоритмах ИМ функционирования  $j$ -го органа используется группа индикаторов  $J_{ijk}$ , где  $i = 1 \dots 21$ ;  $j = 1 \dots 26$ ;  $k = 1 \dots 5$ . В зависимости от значений этих индикаторов алгоритм имитации функций  $j$ -го органа на интервале времени  $\Delta t$  может быть различным. В общем случае значения индикаторов  $J_{ijk}$  могут меняться на пяти уровнях ( $k \leq 5$ ): самый верхний ( $J_{ij1}$ ), верхний ( $J_{ij2}$ ), средний ( $J_{ij3}$ ), нижний ( $J_{ij4}$ ), самый нижний ( $J_{ij5}$ ). Первые десять индикаторов, присутствующие в каждом  $j$ -м органе и подсистеме ЧО<sub>i</sub>, определяют влияние на него следующих подсистем ЧО<sub>i</sub>: энергетической ( $J_{1jk}$ ), лимфатической ( $J_{2jk}$ ), иммунной ( $J_{3jk}$ ), эндокринной ( $J_{4jk}$ ), половой ( $J_{5jk}$ ), нервной ( $J_{6jk}$ ), сосудистой ( $J_{7jk}$ ), кроветворной ( $J_{8jk}$ ), психической ( $J_{9jk}$ ), мышечной ( $J_{10jk}$ ). Вторая группа индикаторов определяет алгоритм поведения органа или подсистемы от факторов воздействия внешней среды и применения ЧО<sub>i</sub> набора оздоровительных процедур.

#### 5. Отклики и статистики имитации

К статистикам имитации, формируемым в момент времени  $t$  с шагом  $\Delta t_0$ , можно отнести:

- состояния  $j$ -го органа, характеризующие уровень его патологии ( $PT_{jit}$ );
- расход ресурса  $j$ -го органа ( $\Delta RS_{\Sigma jit}$ );
- время обслуживания органом транзактов  $\{\tau_{обjit}\}$ ;
- средний процент углекислого газа в артериальной крови ( $\%CO_2$ );
- средний объем кровотока, проходящий через орган ( $V_{крjit}$ );
- давление в сосудах ( $DAVL_{jit}$ ).

По этим статистикам осуществляется калибровка универсальной ИМСДЧ под конкретный ЧО<sub>i</sub>.

С помощью этих статистик формируются отклики ИМСД ЧО<sub>i</sub>. Различаем две группы откликов: локальные и интегральные. В качестве локальных откликов выступают массивы значений перечисленных выше статистик имитации, фиксируемые в те моменты времени  $t_{обк}$ , когда происходило  $k$ -е обследование ЧО<sub>i</sub> в поликлиниках и больницах. Интегральными откликами будут последовательности значений остаточного ресурса органов ( $RS_{jit_0}$ ) и уровня его патологии

$$PT_{jit_0} = 1 - RS_{jit_0};$$

уровень здоровья ЧО<sub>i</sub> в конкретный момент времени:



$$\theta_{it_0} = \min_i \{RS_{jit_0}\};$$

запас жизненных сил  $\mathbf{ЧО}_i$ :

$$Z_{it_0} = \text{mod} \{RS_{jit_0}\}.$$

Показатели  $\theta_{it_0}$  и  $Z_{it_0}$  позволяют однозначно решить поставленные задачи прогноза состояния  $\mathbf{ЧО}_i$  при заданном характере его дыхания и поведения. В качестве вспомогательных критериев анализа состояния  $\mathbf{ЧО}_i$  формируются массивы:

- ✓ момент перехода на  $k$ -й уровень патологии  $j$ -го органа  $\mathbf{ЧО}_i$   $\{\tau_{пкji}\}$ ;
- ✓ момент корректировки запаса жизненных сил органа  $\mathbf{ЧО}_i$  и предотвращение перехода органа  $\mathbf{ЧО}_i$  на  $k$ -й уровень патологии  $\{\tau_{вкji}\}$ .

## 6. Цели моделирования и технология использования ПТКИ

С помощью ИМСДЧ исследователи и врачи смогут решить следующий состав взаимозаменяемых задач:

- 1) Исследование на функционально-логическом уровне динамики реализации процесса дыхания  $\mathbf{ЧО}_i$  при постоянно действующем способе дыхания. ИМСД  $\mathbf{ЧО}_i$  позволит оценить вред от наличия гипервентиляции углекислого газа в легких  $\mathbf{ЧО}_i$ .
- 2) Определение существенности влияния экологических факторов, образа жизни и поведения на органы  $\mathbf{ЧО}_i$ , входящие в СД.
- 3) Оценка эффективности применения оздоровительных процедур для улучшения функционирования СД и стабилизации уровня здоровья  $\mathbf{ЧО}_i$ , определяемого этой системой.
- 4) Ранжирование степени влияния остальных систем жизнеобеспечения (нервной, иммунной, лимфатической, психической, половой, пищеварительной) на органы, входящие в СД.
- 5) Определение условий появления патологических положительных обратных связей в  $\mathbf{ЧО}_i$  при разбалансировке этой подсистемы из-за выхода за допустимые пределы в крови  $\mathbf{ЧО}_i$  базовых компонентов ее качества (% углекислого газа, % гемоглобина и т.д.).

В технологии использования ПТКИ можно выделить следующие этапы исследования  $\mathbf{ЧО}_i$ :

- 1) Получение исходной информации о конкретном  $\mathbf{ЧО}_i$  путем опроса больных по подготовленным заранее формам анкет, данным анализов и диагностическим записям в историях болезни  $\mathbf{ЧО}_i$ .
- 2) Адаптация универсальной ИМСД  $\mathbf{ЧО}_i$  к условиям жизни и состояниям органов конкретного  $\mathbf{ЧО}_i$  по ретроспективной информации.
- 3) Постановка эксперимента с ПТКИ для проверки адекватности ИМСД  $\mathbf{ЧО}_i$  реальному  $\mathbf{ЧО}_i$ .
- 4) Исследование функционирования адаптированной АКИС для оценки уровня здоровья  $\mathbf{ЧО}_i$  с последующим ранжированием факторов по значимости их воздействия на  $\mathbf{ЧО}_i$ .
- 5) Составление прогноза возникновения патологии органов и подсистем  $\mathbf{ЧО}$  на ближайшую перспективу.
- 6) Выработка с помощью адаптированной АКИС стратегии оздоровления  $\mathbf{ЧО}_i$  и формирование рекомендаций поведения в сложившихся условиях его существования, начиная с начального момента

Реализация этапов технологии использования ПТКИ предполагает работу исследователя с готовой ИМСД  $\mathbf{ЧО}_i$ , настроенной на конкретный  $\mathbf{ЧО}_i$ . Это может быть и врач, использующий традиционные методики планирования исследований. На начальных этапах разработки ИМСД  $\mathbf{ЧО}_i$  необходимо сотрудничество группы специалистов в составе врачей, математиков и специалистов по информационным технологиям. Самым трудным является этап настройки универсальной ИМСД  $\mathbf{ЧО}_i$  по данным анкетного опроса конкретного  $\mathbf{ЧО}_i$ . Тем не менее, предложенный в данной работе подход к исследованию поведения  $\mathbf{ЧО}_i$  с по-

мощью компьютерного моделирования системы дыхания человеческого организма, по нашему мнению, имеет перспективу использования и развития.

### Abstract

The author considers a computer modeling of a system of breathing of a human body.

### Литература

1. Метод Бутейко, Опыт внедрения в медицинскую практику: Сборник / Сост. К.П.Бутейко, Одесса: Титул, 1991.
2. I.N.Kravchenya, I.V.Maximey, A.V.Pogorelova, V.P.Sedoy, Program – Technological Complex of Adaptive Conservative Intellectual Systems Simulation, Computer Date Analysis and Modeling: Robustness and Computer Intensive Methods: Proc. of the Sixth International Conference (September 10-14, 20001, Minsk), Vol.2: K-S, Edited by Prof. Dr. S.Aivazian, Prof. Dr. Yu.Kharin and Prof. Dr.H.Rieder, Minsk: BSU, 2001, PP.102-107.
3. И.Н.Кравченя, И.В.Максимей, Т.П.Бышик, А.В.Погорелова, В.П.Седой, Программно-технологический комплекс автоматизации исследований функционирования подсистем человеческого организма, Автоматика – 2000: Міжнародна конференція з автоматичного управління (11–15 вересня 2000 г., Львів): Праці в 7-ми томах, 7, Львів: Державний НДІ інформаційної інфраструктури, 2000, С.67–71.
4. И.В. Максимей, В.Д. Левчук, С.П.Жогаль, В.П. Подобедов, Задачи и модели исследования операций, Ч.3. Технология имитации на ЭВМ и принятие решений: Уч. пособие, Гомель: БелГУТ, 1999.

Поступило 20.05.2002

РЕПОЗИТОРИЙ ГТУ ИМЕНА Д.С.СЕРБИНСКОГО