

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНЕШНЕГО ДЫХАНИЯ ЧЕЛОВЕКА

Г.Р. Камалетдинова¹, П.М. Оневский², В.А. Погонин²

ОАО «Научно-исследовательский и конструкторский институт
химического машиностроения», г. Москва (1);
кафедра «Информационные процессы и управление»,
ФГБОУ ВПО «ТГТУ» (2); onev1@mail.ru

Представлена членом редколлегии профессором Н.Ц. Гагановой

Ключевые слова и фразы: газовая дыхательная смесь; искусственные легкие; концентрация диоксида углерода; потребление кислорода; система управления.

Аннотация: Рассмотрено моделирование функционирования системы управления стендом «Искусственные легкие» в пакете MatLab. Заданная концентрация диоксида углерода в легких при выходе на режим испытательного стенда достигается за счет управления частотой и глубиной дыхания. Потребление кислорода имитируется сбросом части газовой дыхательной смеси в атмосферу на фазе вдоха и подачей соответствующих количеств диоксида углерода и азота.

В настоящее время в России и за рубежом ведется интенсивная разработка технических средств для испытания и исследования средств индивидуальной защиты органов дыхания (СИЗОД) человека. В качестве СИЗОД широкое распространение получили индивидуальные дыхательные аппараты (ИДА) изолирующего типа с химически связанным кислородом, используемые в различных областях в экстремальных ситуациях: на земле и под землей, в космосе и на транспорте, на воде и под водой.

Поскольку испытание ИДА на людях в силу многих причин возможно лишь в ограниченном объеме и в ряде случаев небезопасно, такие испытания целесообразно проводить на специальных установках, называемых «Искусственные легкие» (ИЛ). В настоящее время установка ИЛ должна стать основным инструментом для определения характеристик ИДА и исследования его влияния на характер дыхания человека, что не требует привлечения людей-добровольцев.

Недостатком существующих зарубежных и отечественных установок ИЛ является невозможность изменения формы дыхательной кривой и реализации математическим и программным обеспечением автоматизированной системы управления установки дыхательного коэффициента меньше 1 (то есть при снижении производительности регенеративного патрона ИДА). В существующих установках не предусмотрено также изменение частоты и глубины дыхания для поддержания заданной фиксированной концентрации диоксида углерода в выдыхаемой воздушной смеси при изменении концентрации вдыхаемых газов из ИДА, что реально происходит при испытании ИДА на людях.

Целью данной работы является разработка и исследование Simulink-модели ИЛ, имитирующей внешнее дыхание человека.

Испытательный стенд ИЛ состоит из четырех основных блоков: подачи диоксида углерода и азота; имитации дыхания; имитации потребления кислорода (по массе и объему); управления [1].

Блок имитации дыхания создает пульсирующий поток газовой дыхательной смеси (ГДС), аналогичный потоку, формируемому легкими человека. Блок работает поочередно в режиме вдоха и выдоха.

Аналогично в двух режимах работает блок имитации потребления кислорода путем сброса части ГДС в атмосферу через соответствующие клапаны. Подача смеси диоксида углерода и азота в имитатор дыхания происходит на стадии вдоха.

Для проведения имитационных исследований функционирования стенда при различных психофизиологических состояниях человека необходимо использовать математическую модель потребления кислорода пользователем ИДА.

Основными входными параметрами модели являются: легочная вентиляция $W_{\text{л}}$, $\text{дм}^3/\text{мин}$; глубина дыхания $V_{\text{д}}$, дм^3 ; частота дыхания n , мин^{-1} .

Исходный режим для имитационного моделирования:

- глубина дыхания $V_{\text{д}} = 1,75 \text{ дм}^3$;
- частота дыхания $n = 20 \text{ мин}^{-1}$;
- подача диоксида углерода $W_{\text{CO}_2}(0) = 1,1 \text{ дм}^3/\text{мин}$;
- коэффициент дыхания $K_{\text{д}} = 1$;
- объем системы ИЛ $V_{\text{ИЛ}} = 10 \text{ дм}^3$.

Задачей исследования является обеспечение заданной концентрации диоксида углерода на входе в ИДА (то есть на выдохе из ИЛ) и определение кривых дыхания, реализующих данную концентрацию, путем автоматизации процессов управления стендом ИЛ.

Основные соотношения математической модели:

- подача диоксида углерода за такт вдоха-выдоха, дм^3 ,

$$V_{\text{CO}_2}(0) = W_{\text{CO}_2}(0)/n, \text{ дм}^3; \quad (1)$$

- потребление кислорода за такт вдоха-выдоха

$$V_{\text{O}_2}(0) = W_{\text{CO}_2}(0)/K_{\text{д}}, \text{ дм}^3. \quad (2)$$

Состав ГДС в испытательном стенде перед первым циклом вдоха-выдоха принимался равным атмосферному: $C_{\text{CO}_2}^{\text{ИЛ}} = 0,2 \%$; $C_{\text{O}_2}^{\text{ИЛ}} = 21 \%$; $C_{\text{N}_2}^{\text{ИЛ}} = 100 - C_{\text{CO}_2}^{\text{ИЛ}} - C_{\text{O}_2}^{\text{ИЛ}} = 78,8 \%$.

Объемы газов, поступающих в блок имитации дыхания ИЛ для схемы с имитацией потребления кислорода по массе и объему, дм^3 :

$$V_{\text{CO}_2}^{\text{ИЛ}} = C_{\text{CO}_2}^{\text{атм}} V_{\text{д}}/100; \quad (3)$$

$$V_{\text{O}_2}^{\text{ИЛ}} = C_{\text{O}_2}^{\text{атм}} V_{\text{д}}/100 - V_{\text{O}_2}; \quad (4)$$

$$V_{\text{N}_2}^{\text{ИЛ}} = C_{\text{N}_2}^{\text{атм}} V_{\text{д}}/100, \quad (5)$$

где $C_{\text{CO}_2}^{\text{атм}}$, $C_{\text{O}_2}^{\text{атм}}$, $C_{\text{N}_2}^{\text{атм}}$ – объемные доли газов в атмосферном воздухе, %.

На выдохе соответственно имеем:

$$C_{\text{CO}_2}^{\text{выд}} = \frac{(V_{\text{CO}_2}(0) + C_{\text{CO}_2}^{\text{ИЛ}} V_{\text{ИЛ}}/100 + V_{\text{CO}_2}^{\text{ИЛ}}) \cdot 100}{V_{\text{CO}_2}(0) + V_{\text{ИЛ}} + V_{\text{д}}}; \quad (6)$$

$$C_{\text{O}_2}^{\text{выд}} = \frac{(C_{\text{O}_2}^{\text{ИЛ}} V_{\text{ИЛ}}/100 + V_{\text{O}_2}^{\text{ИЛ}}) \cdot 100}{V_{\text{CO}_2}(0) + V_{\text{ИЛ}} + V_{\text{д}}}; \quad (7)$$

$$C_{\text{N}_2}^{\text{выд}} = 100 - C_{\text{CO}_2}^{\text{выд}} - C_{\text{O}_2}^{\text{выд}}, \quad (8)$$

где $C_{\text{CO}_2}^{\text{выд}}$, $C_{\text{O}_2}^{\text{выд}}$, $C_{\text{N}_2}^{\text{выд}}$ – объемные доли газов на выдохе, %.

Далее полученные значения $C_{CO_2}^{в\text{ЫД}}$, $C_{O_2}^{в\text{ЫД}}$, $C_{N_2}^{в\text{ЫД}}$ подставляются вместо $C_{CO_2}^{\text{ИЛ}}$, $C_{O_2}^{\text{ИЛ}}$, $C_{N_2}^{\text{ИЛ}}$ и так далее для других циклов.

На рисунке 1 представлена упрощенная модель стенда ИЛ, реализованная с помощью пакета моделирования динамических систем Simulink, входящий в состав пакета прикладных программ MatLab.

В блоках fcn и fcn1 с помощью блоков с переменным временем задержки Variable Transport Delay реализована модель процесса дыхания, определяемая выражениями (1) – (8), с возможностью изменения формы дыхательной кривой и дыхательного коэффициента.

Система управления процессом дыхания построена по двухконтурной схеме. Первый контур обеспечивает управление заданной концентрацией диоксида углерода на выдохе путем изменения глубины дыхания, второй – изменением частоты дыхания. Влияние каждого контура на процесс дыхания можно изменять путем соответствующих настроек ПИД-регуляторов PID Controller. Ограничения по глубине и частоте дыхания задаются соответственно блоками Saturation и Saturation1.

Динамические свойства измерителя концентрации диоксида углерода (газоанализатора) на выдохе моделируются введением временной задержки $\tau = 60$ с в контуры обратных связей с помощью блоков Transport Delay и Transport Delay1. Динамикой исполнительных механизмов пренебрегаем ввиду их слабого влияния на динамические свойства системы.

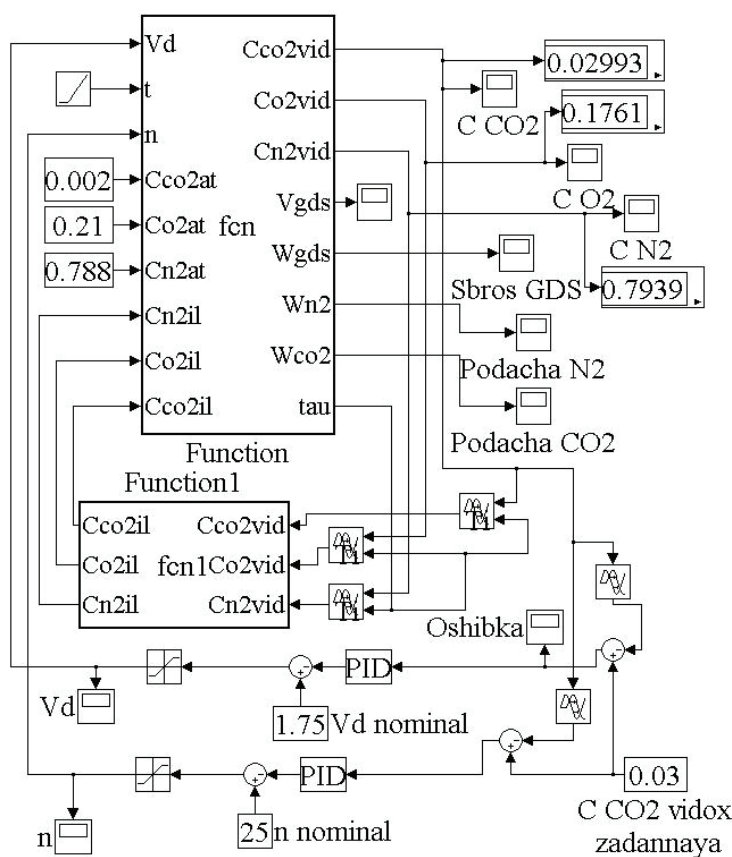


Рис. 1. Simulink-модель стенда ИЛ

На рисунках 2–4 представлены результаты имитационных исследований, которые характеризуют переходные режимы работы стенда ИЛ для различных заданных концентраций диоксида углерода на входе в ИДА.

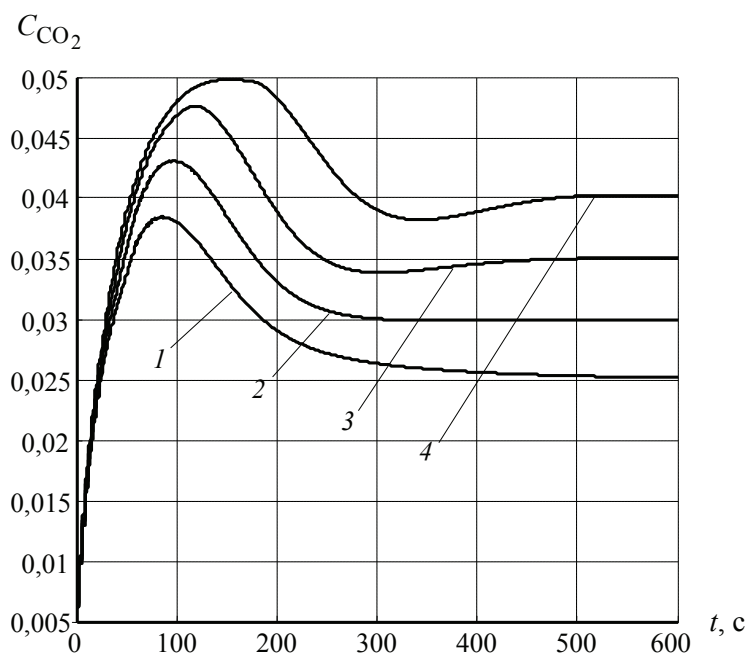


Рис. 2. Концентрация CO_2 в искусственных легких для различных заданных концентраций CO_2 :
 1 – 0,025; 2 – 0,03; 3 – 0,035; 4 – 0,04

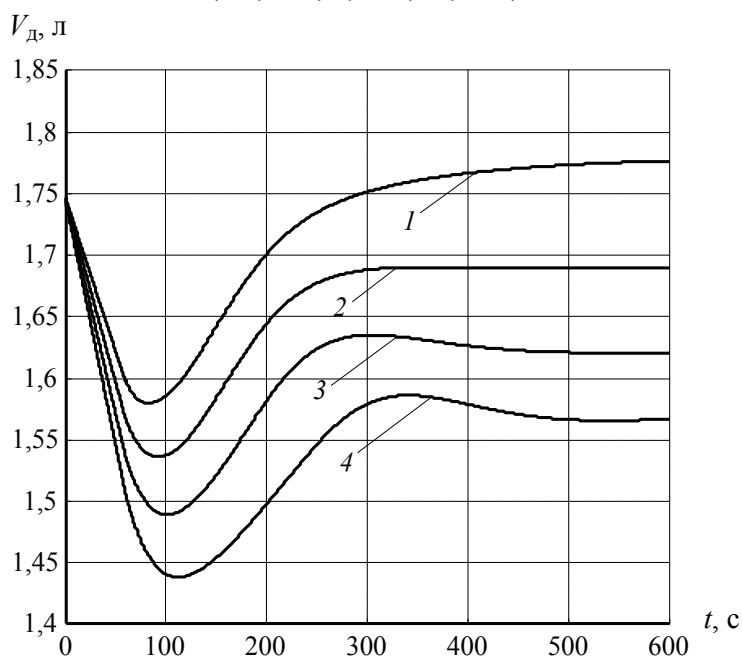


Рис. 3. Глубина дыхания V_d в зависимости от заданной концентрации CO_2 на входе в ИДА:
 1 – 0,025; 2 – 0,03; 3 – 0,035; 4 – 0,04

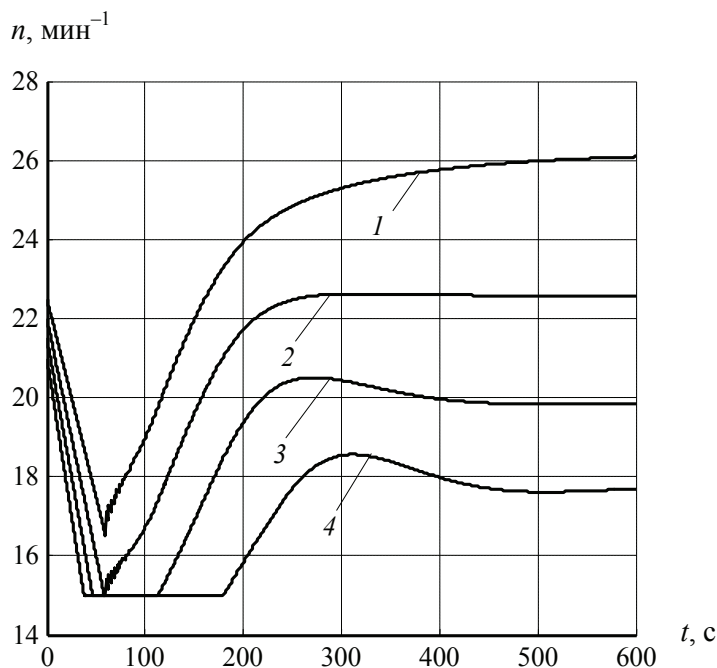


Рис. 4. Частота дыхания n при различных заданных концентрациях CO_2 :
 1 – 0,025; 2 – 0,03; 3 – 0,035, 4 – 0,04

На рисунке 2 представлены кривые изменения концентрации диоксида углерода при выходе на режим испытательного стенда для различных заданных концентраций диоксида углерода.

На рисунках 3 и 4 представлены управляющие воздействия, реализующие заданные концентрации диоксида углерода.

Результаты моделирования показывают, что испытательный стенд выходит на номинальный режим работы ($C_{\text{CO}_2}^{\text{выд}} = 0,03$) менее чем за 5 мин с точностью до 0,1 %, что подтверждается результатами испытаний реального стенда при «ручном» управлении. С увеличением концентрации диоксида углерода на выходе из блока имитации дыхания уменьшается глубина и частота дыхания. Минимальная частота дыхания ограничивалась величиной 15 мин^{-1} .

Таким образом, автоматизация процессов управления стендом ИЛ позволяет повысить точность воспроизведения реальных дыхательных процессов, присущих человеку в различных психофизиологических состояниях. Полученные результаты могут быть использованы при принятии оптимальных проектных решений на всех этапах разработки и сопровождения ИЛ.

Работа выполнена в рамках соглашения №14.В37.21.2083 Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.

Список литературы

1. Гудков, С.В. Совершенствование методики испытания изолирующих дыхательных аппаратов с химически связанным кислородом / С.В. Гудков, Д.С. Дворецкий, А.Ю. Хромов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2009. – Т. 15, № 3. – С. 589–597.

Simulation of Human External Respiration

G.R. Kamaletdinova¹, P.M. Onevsky², V.A. Pogonin²

Scientific Research and Design Institute of Chemical Engineering, Moscow (1);

Department "Information Processes and Control", TSTU (2);

onevl@mail.ru

Key words and phrases: artificial lungs; carbon dioxide concentration; control system; oxygen consumption; respiratory gas.

Abstract: The paper examines the simulation of control over "Artificial lungs" facility in MatLab package. A given concentration of carbon dioxide in the lungs in testing mode is achieved by controlling the rate and depth of breathing. Oxygen consumption is simulated by respiratory gas discharge in the atmosphere in inspiratory phase and supply of the corresponding quantity of carbon dioxide and nitrogen.

Imitationsmodellierung der äußerlichen Atmung des Menschen

Zusammenfassung: Es ist die Modellierung des Funktionierens des Systems der Steuerung vom Stand «Künstliche Lungen» im Paket MatLab betrachtet. Die aufgegebene Konzentration des Kohlendioxides in den Lungen beim Ausgang auf das Regime des Prüfstandes wird auf Kosten von der Steuerung von der Frequenz und der Tiefe der Atmung erreicht. Der Verbrauch des Sauerstoffes wird von der Ableitung des Teiles der Gasatmungs Mischung in die Atmosphäre auf der Phase des Einatmes und der Abgabe der entsprechenden Zahlen des Kohlendioxides und des Stickstoffes imitiert.

Modélage de simulation de la respiration extérieure de l'homme

Résumé: Est examiné le fonctionnement du système de la commande du stand «Poumons artificiels» dans le paquet de MatLab. La concentration donnée du dioxyde de l'hydrogène dans les poumons lors de la sortie sur le régime du stand d'essai est obtenue compte tenu de la commande de la fréquence et de la profondeur de la respiration. La consommation de l'oxygène est simulée par l'évacuation d'une partie du mélange gazeux de respiration dans l'atmosphère à la phase de l'aspiration et par le débit de la quantité correspondante du dyoxyde de l'hydrogène et de l'azote.

Авторы: *Камалетдинова Гузель Ринатовна* – научный сотрудник, ОАО «Научно-исследовательский и конструкторский институт химического машиностроения», г. Москва; *Оневский Павел Михайлович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные процессы и управление»; *Погонин Василий Александрович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Информационные процессы и управление», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

Рецензент: *Матвейкин Валерий Григорьевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные процессы и управление» ФГБОУ ВПО «ТГТУ», заместитель генерального директора, ОАО «Корпорация «Росхимзащита», г. Тамбов.