

АНАЛИЗ ПРИНЦИПОВ ПОСТРОЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ВНЕШНЕГО ДЫХАНИЯ ЧЕЛОВЕКА

Н.Н. Жданов¹, А.А. Третьяков², В.Н. Назаров²

ОАО «Казанский химический научно-исследовательский институт», г. Казань (1);
кафедра «Информационные процессы и управление», ФГБОУ ВПО «ТГТУ» (2);
ipu@ahp.tstu.ru

Представлена членом редколлегии профессором В.Г. Матвейкиным

Ключевые слова и фразы: внешнее дыхание человека; изолирующий дыхательный аппарат; математическая модель; средства индивидуальной защиты органов дыхания; установка «Искусственные легкие».

Аннотация: Определены факторы, влияющие на внешнее дыхание человека с целью разработки его математической модели.

Согласно п. 13 Положения «Основы государственной политики в области обеспечения химической и биологической безопасности РФ», основными задачами в области развития фундаментальной науки является разработка и внедрение систем индивидуальной защиты человека и разработка специальных медицинских средств защиты и лечения, что входит в перечень критических технологий РФ. Разработка новых и совершенствование существующих средств индивидуальной защиты органов дыхания (СИЗОД) невозможны без проведения испытаний средств защиты в реальных условиях. Эти испытания проводятся или в условиях использования СИЗОД человеком, или с применением специальных установок, имитирующих дыхание человека. Такие системы имитации дыхания человека в специальной литературе получили название установки «Искусственные легкие» (ИЛ).

Один из основных классов СИЗОД – изолирующие дыхательные аппараты (ИДА) с химически связанным кислородом, которая используются в различных областях в экстремальных ситуациях: на земле и под землей, в космосе и на транспорте, на воде и под водой [1, 2].

Принцип действия ИДА с химически связанным кислородом основан на изоляции органов дыхания и зрения человека от окружающей среды и обеспечении дыхания за счет регенерации дыхательной смеси [3]. Указанный принцип действия обуславливает такие важнейшие качества СИЗОД, как защита от всех токсичных веществ самой разнообразной химической и биологической природы при предельно высоком содержании токсичных веществ в атмосфере. К достоинствам ИДА с химически связанным кислородом относятся: простота конструкции, экономное расходование кислорода, возможность длительного пребывания в состоянии ожидания использования при минимальных проверках готовности, минимальные масса и габариты аппаратов, сравнительно небольшая стоимость.

В настоящее время установки ИЛ являются основным инструментом для определения характеристик ИДА, что не требует привлечения людей-добровольцев [3].

Воспроизводство параметров внешнего дыхания при помощи систем имитации дыхания человека (установок ИЛ) является крайне важным для выполнения задач по сертификации и периодических испытаний существующих СИЗОД (самоспасателей, изолирующих дыхательных аппаратов), а также для качественной разработки новых СИЗОД и специальных медицинских средств (устройств искусственной вентиляции легких, медицинских генераторов кислорода и др.).

Установки ИЛ представляют собой программно-аппаратный комплекс, имитирующий ряд физиологических и психофизиологических процессов, протекающих в организме человека, совокупность которых носит название внешнего дыхания человека, в том числе и потребление кислорода и выделение диоксида углерода.

При этом используются различные схемы работы и имитации: сжигание в камере газовой смеси с последующими возвратом полученных газов в ИЛ, замещение вытесненных в атмосферу выходящих из ИДА газов из баллонов со сжиженными газами и др. [4].

Недостатками существующих зарубежных и отечественных установок ИЛ являются невозможность изменения формы дыхательной кривой, что не позволяет имитировать различные психофизиологические состояния человека, и реализации математическим и программным обеспечением автоматизированной системы управления комплекса дыхательного коэффициента меньше 1, так как в процессе испытаний производительность регенеративного патрона ИДА снижается, что приводит к уменьшению данного коэффициента до 0,5...0,8.

Следовательно, для повышения эффективности испытания ИДА необходимо обеспечить реализацию на установке ИЛ различных форм кривой дыхания и значений дыхательного коэффициента.

Для повышения эффективности проведения испытаний ИДА предлагаются различные схемы дозирования газов (сброса кислорода в атмосферу, подачу азота и диоксида углерода) на основе сильфонных и поршневых насосов, работающих с шаговыми и линейными двигателями. Использование предложенной технической реализации не представляется возможным в отсутствие системы управления и математической модели, адекватной внешнему дыханию человека, учитывающей приспособительные реакции организма на такие воздействия, как изменения нагрузки, условий дыхания, положения тела, давления, воздействие ускорений или изменения состава ГДС [6].

Все вышеописанные факторы влияют на форму кривой дыхания и, соответственно, на легочную вентиляцию, что, в свою очередь, влияет на характер работы СИЗОД и время его защитного действия, поскольку неравномерный поток, проходящий через регенеративный патрон ИДА по сравнению с равномерным, значительно изменяет характер протекающих в нем процессов.

Следовательно, в установке ИЛ необходимо реализовать такое изменение нагрузки посредством смены режимов испытаний с постоянными параметрами дыхания, которое обеспечило бы параметры дыхания, характерные человеку в реальных условиях.

Исследование влияние вышеперечисленных факторов на легочную вентиляцию и работу ИДА возможно с использованием инструментов имитационного моделирования. Однако существующие математические модели внешнего дыхания человека не учитывают большую часть факторов, влияющих на внешнее дыхание (сопротивление дыханию, давление и температура окружающей среды, психофизиологическое состояние и др.). Поэтому их использование для целей

исследования процесса дыхания и в составе автоматизированной системы управления установкой ИЛ нецелесообразно.

Таким образом, для исследования вышеперечисленных факторов необходимо разработать математическую модель внешнего дыхания человека, учитывающую реакцию организма на различные воздействия, в том числе взаимное влияние системы «Человек – СИЗОД» [4].

С целью создания адекватной математической модели внешнего дыхания человека рассмотрим внешнее дыхание человека и факторы, влияющие на него. Внешнее дыхание человека, это ряд физиологических процессов, с помощью которых осуществляется транспорт газов из легких, а именно альвеолярного пространства [7]. Данные процессы характеризуются рядом параметров, таких как глубина дыхания, частота дыхания, объем выделенного диоксида углерода, объем поглощенного кислорода и форма кривой дыхания. Изменение внешнего дыхания человека, а именно одного или нескольких описанных параметров, происходит под воздействием на организм ряда факторов, которые можно условно разделить две группы [8]:

1) факторы, воздействие которых связано с изменением внутреннего дыхания и, как следствие, внешнего дыхания, а именно: воздействие нагрузки, изменения психофизиологического состояния (испуг, эйфория и т. д.). Все эти факторы влияют на внутренний метаболизм и как следствие внешнее дыхание, призванное обеспечить должный газообмен между атмосферой и организмом человека.

2) факторы, чье воздействие связано с изменением условий, при которых происходит газообмен, к ним относятся: изменение сопротивления дыханию, изменение давления окружающей среды, воздействие дополнительного мертвого пространства, изменение положения тела, изменения газового состава дыхательной смеси и ее температуры, и др.

Из анализа [7, 8] установлено, что вторую группу факторов можно разделить на подгруппы, влияющие:

1) на градиент диффузии газов в легких: изменение концентраций дыхательных газов, главным образом кислорода и диоксида углерода; изменение температуры ГДС; изменение давления; изменение сопротивления дыханию

2) дыхательный объем легких и объем газа, участвующий в газообмене: изменение положения тела; изменение мертвого пространства.

К первой подгруппе отнесем следующие факторы:

Ко второй подгруппе можно отнести следующее факторы:

В авторском свидетельстве [4] рассмотрено влияние нагрузки на внешнее дыхание человека, обусловленное метаболизмом (внутренним дыханием) человека, а именно биологическим окислением, необходимым для обеспечения энергией организма. Биологическое окисление:



При возрастающей потребности в энергии в организме протекает большее количество реакций, увеличивая таким образом потребление кислорода и выделение диоксида углерода. Из уравнения видно, что коэффициент дыхания (отношение количества поглощенного кислорода к количеству выделенного диоксида углерода) равен 1, что соответствует действительности только при легочной вентиляции до 70 л/мин, при этом ее увеличение происходит пропорционально росту потребления кислорода. При легочной вентиляции свыше 70 л/мин она растет быстрее, чем рост энергозатрат. Дальнейший непропорциональный рост легочной вентиляции обуславливается стимуляцией хеморецепторов кислыми продуктами мышечного обмена [1].

Изменение сопротивления дыханию влияет на энергозатраты организма, необходимые для осуществления одного цикла дыхания. При увеличении сопротивления дыханию, например при включении в СИЗОД, максимальное сопротивление дыханию которых может составлять до 80 мм вод. ст. [3], диафрагменные мышцы затрачивают большее количество энергии, что, в свою очередь, значительно влияет на минутный объем дыхания (МОД) [8].

Изменение давления дыхательной смеси оказывает влияние на парциальные давления дыхательных газов, что влияет на диффузию газов в легких [8]. С ростом давления дыхательной смеси в два раза, парциальное давление газов, входящих в состав смеси, также возрастет в два раза, при этом нормальный газовый состав атмосферного воздуха (содержание диоксида углерода 0,03 %) становится менее пригодным для дыхания, а при давлении 3,6 атм. становится полностью непригодным, вследствие достижения предельно допустимого парциального давления диоксида углерода. Следствием изменения давления дыхательной смеси становится существенное изменение МОД.

Мертвое пространство представляет собой часть дыхательного объема, равного объему воздухоносных путей [4]. При каждом вдохе в легкие перемещается определенный объем дыхательной смеси, часть которого остается в воздухоносных путях и в газообмене не участвует. При этом человеку необходимо затрачивать энергию на перемещение «мертвого» объема газа.

Увеличение мертвого пространства, например вследствие использования СИЗОД, имеющих свои воздухоносные пути, влечет за собой увеличение энергозатрат на каждый вдох, при этом изменяется форма кривой дыхания при сохранении МОД.

Положение тела влияет на жизненную емкость легких (ЖЕЛ) – объем воздуха, перемещенный в легкие при самом максимальном вдохе. Данное влияние можно описать следующими отношениями [1]:

- при положении стоя ЖЕЛ на 5 % больше, чем при положении сидя;
- при положении сидя на 3 % больше, чем в положении лежа.

Изменение концентрации кислорода в дыхательной среде, и как следствие его парциального давления в альвеолярном пространстве, можно охарактеризовать следующим образом: при увеличении парциального давления кислорода P_{O_2} свыше 60 мм рт. ст. легочная вентиляция изменяется незначительно [8]. Значительное увеличение вентиляции наблюдается при падении парциального давления кислорода ниже 40 мм рт. ст., из чего можно сделать вывод, что значительное падение парциального давления кислорода не влечет за собой резкого изменения МОД.

Изменение парциального давления диоксида углерода в альвеолярном пространстве с нормального 40 до 45 мм рт. ст. влечет за собой значительное увеличение легочной вентиляции с 7 до 25...30 л/мин, что говорит о значительной чувствительности организма к диоксиду углерода, а также о том, что основные изменения параметров внешнего дыхания человека происходят вследствие увеличения выделения последнего, а не от увеличения потребления кислорода.

Изменение психофизиологического состояния человека (состояние испуга, растерянности и др.) влечет за собой изменение формы кривой дыхания: увеличивается частота дыхания с 10...16 до 25...30 мин⁻¹ со значительным изменением глубины дыхания. При этом МОД практически не изменяется, изменяется лишь форма кривой дыхания и количество кислорода, поступающего к альвеолам вследствие влияния мертвого пространства. При этом возможна задержка дыхания на 15...20 с с последующей нормализацией МОД [3].

Математическая модель внешнего дыхания человека, учитывающая описанные факторы, может использоваться для проведения имитационных исследований режимов работы установки, а также в качестве прогнозирующей модели в составе системы управления установкой ИЛ [9].

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. Грачев, В.А. Средства индивидуальной защиты органов дыхания СИЗОД / В.А. Грачев, С.В. Собратьев. – 2-е изд. – М. : Пожарная книга, 2006. – 232 с.
2. Изолирующие дыхательные аппараты и основы их проектирования : учеб. пособие / С.В. Гудков [и др.]. – М. : Машиностроение, 2008. – 188 с.
3. ГОСТ Р 12.4.220–2001 ССБТ. Средства индивидуальной защиты органов дыхания. Аппараты изолирующие автономные с химически связанным кислородом (самоспасатели). Общие технические требования. Методы испытаний. – Введ. 2002–00–01. – М. : Изд-во стандартов, 2001. – 23 с.
4. А.с. 119800 СССР, МПК⁶ А 62 В 27/00. Стенд для испытания кислородно-дыхательной аппаратуры / Н.С. Диденко (СССР). – № 605608/31 ; заявл. 08.08.58 ; опубл. 01.01.59, Бюл. № 9. – 4 с.
5. Kyriazi, N. Development of an Automated Breathing Metabolic Simulator / N. Kyriazi. – Pittsburgh, PA : U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Mines, 1986. – 17 p. – (IC 9110).
6. Руководство по клинической физиологии дыхания / под ред. Л.Л. Шика и Н.Н. Канаева. – Л. : Медицина, 1980. – 375 с.
7. Холдэн, Дж.С. Дыхание : пер. с англ. / Дж.С. Холдэн, Дж.Г. Пристли. – М. ; Л. : Гос. изд-во биол. и мед. лит., 1937. – 464 с.
8. Бреслав, И.С. Как управляется дыхание человека / И.С. Бреслав. – Л. : Наука, 1985. – 158 с.
9. Итеративные прогнозирующие алгоритмы терминального управления нелинейными объектами / П.М. Оневский [и др.] // Системы упр. и информ. технологии. – 2011. – № 2 (44). – С. 34–39.

Analysis of Principles of Mathematical Model Construction of Human External Respiration

N.N. Zhdanov¹, A.A. Tretyakov², V.N. Nazarov²

*Kazan Chemical Research Institute, Kazan (1);
Department “Information Processes and Control”, TSTU (2);
ipu@ahp.tstu.ru*

Key words and phrases: “Artificial lungs” device; breathing apparatus; external human respiration; mathematical model; personal respiratory protection.

Abstract: The paper studies the factors affecting human external respiration in order to develop its mathematical model.

Analyse der Prinzipien der Konstruktion der mathematischen Modelle der äußerlichen Atmung des Menschen

Zusammenfassung: Es sind die Faktoren, die auf die äußerliche Atmung des Menschen zwecks der Entwicklung seines mathematischen Modells einflussen, festgelegt.

Analyse des principes de la construction des modèles mathématiques de la respiration extérieure de l'homme

Résumé: Sont définis les facteurs qui influencent sur la respiration extérieure de l'homme dans le but d'élaborer son modèle mathématique

Авторы: *Жданов Николай Николаевич* – инженер, ОАО «Казанский химический научно-исследовательский институт», г. Казань; *Третьяков Александр Александрович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные процессы и управление»; *Назаров Виктор Николаевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные процессы и управление», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

Рецензент: *Погонин Василий Александрович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Информационные процессы и управление», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».
