

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ИСПЫТАНИЯ ИЗОЛИРУЮЩИХ ДЫХАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С ХИМИЧЕСКИ СВЯЗАННЫМ КИСЛОРОДОМ

С.В. Гудков¹, Д.С. Дворецкий², А.Ю. Хромов²

*ОАО «Корпорация "Росхимзащита"» (1);
кафедра «Технологическое оборудование и пищевые
технологии», ГОУ ВПО «ТГТУ» (2); topt@topt.tstu.ru*

Представлена членом редколлегии профессором Н.Ц. Гапановой

Ключевые слова и фразы: блок имитации потребления кислорода; газовая дыхательная смесь; изолирующий дыхательный аппарат; имитатор дыхания; легочная вентиляция; параметры дыхания; частота и глубина дыхания.

Аннотация: Проведен анализ взаимного влияния элементов системы «человек – дыхательный аппарат». Предложена усовершенствованная схема испытательного стенда «Искусственные легкие», адекватно имитирующая дыхание человека при испытании изолирующих дыхательных аппаратов. Программная реализация имитации потребления кислорода по массе на испытательном стенде «Искусственные легкие» позволит проводить испытания с минимальным вмешательством оператора и максимально точно дозировать исходные компоненты для формирования газовой дыхательной смеси и имитировать потребление кислорода.

При проектировании и вводе в эксплуатацию изолирующих дыхательных аппаратов (ИДА) с химически связанным кислородом необходимо проведение исследования показателей их работоспособности в режимах, соответствующих различным состояниям пользователя (бодрствование, усталость, стресс (испуг), кашель, чихание и другие показатели способные повлиять на изменение уровня физической нагрузки). Перечень показателей регламентирован и включает время защитного действия, сопротивление дыханию, объемную долю диоксида углерода и температуру вдыхаемой газовой дыхательной смеси (ГДС). Такое исследование проводится на испытательном стенде «Искусственные легкие» (ИЛ).

Основным недостатком действующих ИЛ является неточная имитация потребления кислорода человека путем удаления из системы «ИДА – ИЛ» определенного объема ГДС (имитация потребления по объему). При этом вместе с кислородом удаляется азот и углекислый газ, содержание которых в системе падает, чего не наблюдается в ходе испытания на людях-добровольцах. Испытания на установках такого типа также приводят к росту объемной доли кислорода во вдыхаемой ГДС. По существующим требованиям для дыхательных аппаратов длительного действия (свыше 4-х часов) определено время пребывания в атмосфере, зависящее от содержания кислорода, уровня физической нагрузки или внешнего

давления. При превышении предельного времени пребывания наступает отравление человека кислородом. Поэтому в установке ИЛ необходимо с высокой точностью регулировать объемную долю кислорода во вдыхаемой ГДС.

Для изучения работы ИДА практическое значение имеют процессы, происходящие при так называемом внешнем, или легочном дыхании, к которым относятся вентиляция легких человека поступающим в них воздухом и процессы газо-, тепло- и влагообмена между вдыхаемым и выдыхаемым воздухом. Вентиляция легких атмосферным воздухом и газовой дыхательной смесью, имеющейся в дыхательных аппаратах, осуществляется в результате дыхательных движений грудной клетки – вдохов и выдохов. Основными параметрами, характеризующими этот процесс, являются объем одного вдоха или выдоха (глубина дыхания) V_d , а также частота дыхания n , или число циклов вдох/выдох в единицу времени. Наиболее важным параметром, характеризующим дыхание человека, является легочная вентиляция W_d , которая выражается произведением величин V_d и n и представляет собой объем воздуха, вентилирующийся в легких в единицу времени. Этот параметр напрямую связан с величиной физической нагрузки, выполняемой человеком.

Последняя порция каждого выдоха остается в воздуховодных путях и при последующем вдохе возвращается в легкие, соответственно при каждом выдохе равный объем предыдущего вдоха возвращается в атмосферу. Этот объем дыхательных путей, составляющий у взрослого человека около 0,14 л, называется, как и в случае с дыхательными аппаратами, мертвым (или вредным) пространством.

Каждому уровню интенсивности физической нагрузки соответствует определенная для каждого человека величина легочной вентиляции. Частота и глубина дыхания подвержены большим изменениям: одна и та же легочная вентиляция может быть получена как при частом и поверхностном дыхании, так и при редком и глубоком. Последний тип дыхания предпочтителен в смысле улучшения условий дыхания в ИДА, так как в этом случае уменьшается влияние на вентилирование легких вредного пространства самого ИДА и обеспечиваются лучшие условия для поглощения кислорода человеком.

При проведении испытаний ИДА на установке ИЛ параметры дыхания (легочная вентиляция, глубина и частота дыхания) периодически изменяются вручную, в то время как при использовании ИДА человеком происходит непрерывное изменение параметров дыхания в ответ на изменение характеристик аппарата. Поэтому возникает несоответствие условий и, как следствие, результатов испытаний ИДА на установках ИЛ и людях-добровольцах.

До настоящего времени взаимное влияние ИДА и человека в процессе выполнения пользователем какой либо работы изучено не в полной мере. Известно, что мышечная работа человека вызывает увеличение глубины и частоты дыхания. Дыхание в замкнутой системе дает тот же эффект, но при этом не учитывается изменение дыхания при его имитации в процессе испытания дыхательного аппарата.

Мишер–Рюш еще в 1885 г. показал экспериментально на человеке, что даже небольшое увеличение содержания диоксида углерода во вдыхаемом воздухе достаточно сильно влияет на параметры дыхания (глубина и частота дыхания), в то время как соответствующее уменьшение количества кислорода практически не оказывает никакого действия. Таким образом, химическая регуляция дыхания обычно определяется изменением содержания в воздухе диоксида углерода, а не кислорода.

Экспериментально установлено, что при увеличении объемной доли диоксида углерода во вдыхаемом воздухе до 3 % и одновременном уменьшении кислорода на 17 % (считая, что в нормальном воздухе содержится 20,93 % кислорода и

0,03 % диоксида углерода) частота дыхания начинает резко усиливаться. По мере ухудшения состава воздуха, усиление частоты дыхания становится все более и более выраженным и при достижении содержания диоксида углерода до 6 % и кислорода до 13 % наступают одышка и другие явления «истощения» дыхания. Однако при постоянстве содержания диоксида углерода во вдыхаемом воздухе увеличение частоты дыхания наступает при снижении объемной доли кислорода до 12 % и ниже. При увеличении объемной доли диоксида углерода выше предельно допустимого значения имеет место наркотическое действие на человека, в то время как при малой объемной доле наблюдается стимуляция дыхания человека [3].

При испытании ИДА на людях-добровольцах элементы системы «Человек – ИДА» оказывают взаимное влияние друг на друга. При работе пользователя в ИДА режим работы аппарата постоянно меняется, несмотря на то что человек выполняет работу с постоянной нагрузкой. Одновременно меняется характер дыхания человека при изменении работы ИДА. Наблюдается двусторонняя взаимосвязь между пользователем и дыхательным аппаратом. Человек реагирует на повышение объемной доли диоксида углерода во вдыхаемой ГДС увеличением легочной вентиляции, на что аппарат отвечает увеличением сопротивления дыхания, что, в свою очередь, приводит к изменению формы кривой дыхания (пневмотахограммы) от синусоидальной к трапециoidalной в связи с утомляемостью человека при дыхании с большой глубиной.

Таким образом, при использовании ИДА человеком происходит изменение параметров дыхания и, в первую очередь, легочной вентиляции. Величина изменения режима также зависит от подготовки человека к физическим нагрузкам и от стресса. В то же время при испытаниях ИДА на существующих установках ИЛ поддерживаются фиксированные режимы испытаний.

Повышение объемной доли диоксида углерода во вдыхаемой ГДС объясняется увеличением вредного пространства, которое образуется вследствие смещения фронта химической реакции в регенеративном патроне. При этом вредное пространство ИДА складывается с вредным пространством человека, и суммарный объем увеличивается в процессе исчерпания ресурса регенеративного патрона, что влечет за собой увеличение объемной доли диоксида углерода во вдыхаемой ГДС. По данным работы [1] человек рефлекторно увеличивает легочную вентиляцию, при вдыхании газовой смеси с объемной долей 1 % CO_2 легочная вентиляция увеличивается на 8,4 %, а с объемной долей 2 % CO_2 – на 28,8 %. Здесь ключевую роль играет уровень парциального давления в альвеолярном воздухе, который является биологической константой (5,3 кПа), и незначительное увеличение этой величины приводит к росту интенсивности легочной вентиляции. Зависимость легочной вентиляции испытуемого от объемной доли диоксида углерода во вдыхаемой ГДС при дыхании в ИДА показана на рис. 1.

В целом, анализ влияния характеристик аппарата на параметры дыхания человека является одной из ключевых задач совершенствования методики исследования ИДА и конструирования новых установок ИЛ, адекватно имитирующих дыхание человека.

Согласно Европейскому стандарту EN 13794:2002 в ходе испытаний необходима адаптивная подстройка всех параметров режима имитации дыхания [2].

В предлагаемой нами методике предпринята попытка имитации потребления кислорода путем сброса в атмосферу рассчитываемого объема ГДС с одновременной подачей азота и диоксида углерода в тех количествах, которые удаляются при сбросе ГДС в атмосферу. Расчет объемов подачи азота и диоксида углерода в систему имитации осуществляется с использованием математической модели потребления кислорода пользователем ИДА.

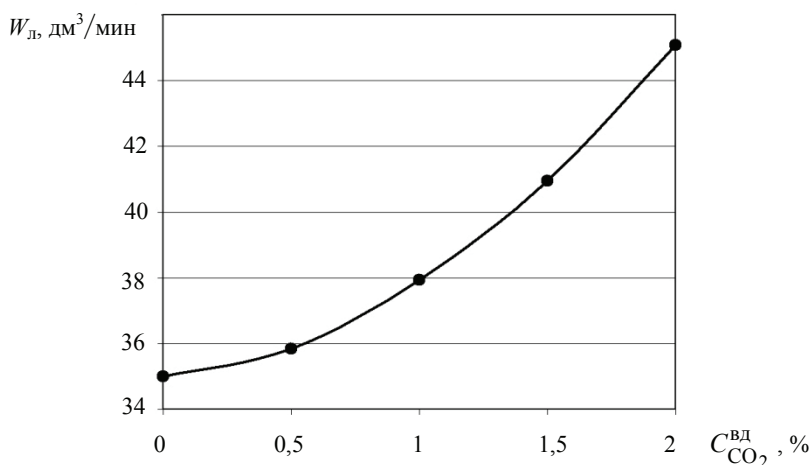


Рис. 1. Зависимость легочной вентиляции от объемной доли диоксида углерода во вдыхаемой ГДС

Испытательный стенд ИЛ, который состоит из четырех блоков: блок подачи диоксида углерода и азота I, блок имитации дыхания II, блок имитации потребления кислорода (по массе и объему) III, блок управления IV (рис. 2).

Блок имитации дыхания II с помощью имитатора дыхания 6 создает пульсирующий поток ГДС, аналогичный потоку, формируемому легкими человека. Блок работает поочередно в режиме вдоха и выдоха. При вдохе датчик положения поршня имитатора дыхания 6 открывает клапан 11 и закрывает клапан 10, при выдохе – наоборот.

Блок имитации потребления кислорода III аналогично блоку имитации дыхания работает в двух режимах. При вдохе клапаны 15, 17 открываются, 20 – закрывается, при выдохе – наоборот. Управляемый вентиль 16 регулирует величину сброса ГДС для обеспечения имитации потребления кислорода.

Испытательный стенд работает следующим образом. При запуске испытательного стенда, происходит включение привода (на рисунке не показан) имитатора дыхания 6 и электромагнитных клапанов 10, 11, 15, 17, 20. Данный режим является режимом холостого хода. В блок управления IV вводятся данные о режиме испытания, и подается сигнал на включение нагревателя 7, холодильника 13, регулируемых клапанов 1, 2 и управляемого вентиля 16. Из ресиверов (на рисунке не показаны) через регулируемые клапаны 1 и 2 поступают диоксид углерода и азот согласно заданному режиму.

Испытания начинаются с момента подключения ИДА 21 к испытательному стенду. На стадии вдоха осуществляется подача ГДС из ИДА 21 в имитатор дыхания 6 через клапан 11, газоанализатор 12, холодильник 13 и обратный клапан 14.

Отбор ГДС ведется блоком имитации потребления кислорода III, а подача смеси диоксида углерода и азота происходит через обратный клапан 4. На стадии вдоха вычислительным устройством подается сигнал на открытие регулируемых клапанов 1, 2 и управляемого вентиля 16 в соответствии с заданным режимом испытания. Газоанализатором 12 определяется объемная доля кислорода и диоксида углерода во вдыхаемой ГДС. По результатам анализа происходит сброс части ГДС из холодильника 13 через клапаны 15 и 17 в атмосферу. Потребление кислорода осуществляется циклически на стадии вдоха.

На стадии выдоха обратные клапаны 4 и 14 отсекают от имитатора дыхания 6 блок подачи диоксида углерода и азота I и холодильник 13. Подготовленная ГДС из имитатора дыхания 6 подается в ИДА 21 через нагреватель 7, газоанализатор 8, расходомер 9 и клапан 10.

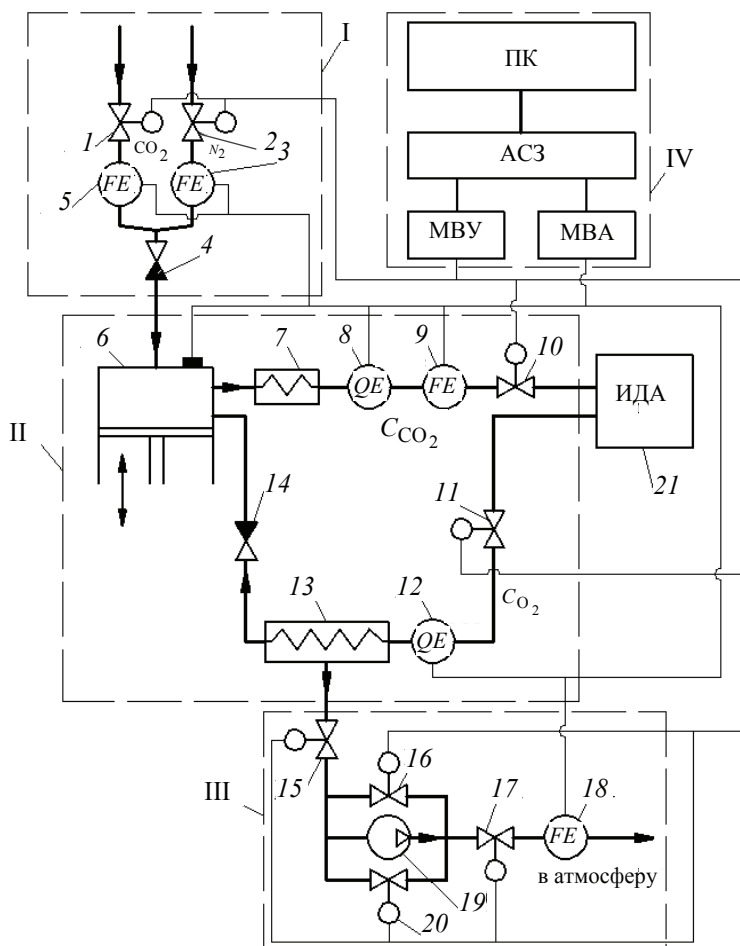


Рис. 2. Схема испытательного стенда ИЛ:

1, 2 – управляемый клапан; 3, 5 – счетчик расхода газа; 4, 14 – обратный клапан;
 6 – имитатор дыхания; 7 – нагреватель; 8, 12 – газоанализатор; 9, 18 – расходомеры;
 10, 11, 15, 17, 20 – клапан; 13 – холодильник; 16 – управляемый вентиль;
 19 – насос; 21 – ИДА

Блок управления IV считывает данные об объемной доле диоксида углерода во вдыхаемой ГДС с газоанализатора 12. При достижении заданных величин объемной долей диоксида углерода во вдыхаемой ГДС происходит изменение легочной вентиляции (глубины и частоты дыхания) сменой режима работы имитатора дыхания б.

Для обеспечения имитации дыхания человека в зависимости от его состояния (бодрость, усталость, реакция на резкое изменение нагрузки) на стенде осуществляется автоматическая коррекция коэффициента дыхания K_d , который характеризует отношение выделившегося диоксида углерода из организма $W_{CO_2}(0)$ к поглощенному кислороду W_{O_2} в ходе работы в единицу времени.

Коррекция коэффициента дыхания K_d производится в блоке имитации потребления кислорода III путем изменения сброса ГДС $W^{ГДС}$ в атмосферу на стадии вдоха. Зависимость изменения $W^{ГДС}$ от K_d показана на рис. 3, а, б.

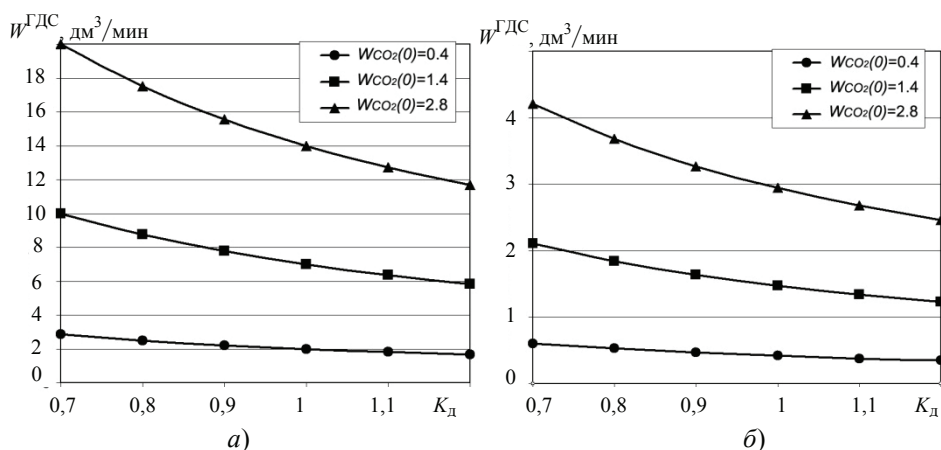


Рис. 3. Зависимость изменения $W^{\text{ГДС}}$ при изменении K_d :

$$a - C_{\text{O}_2}^{\text{вд}} = 20 \% ; \quad б - C_{\text{O}_2}^{\text{вд}} = 95 \%$$

Анализ рис. 3, а, б показывает, что величина $W^{\text{ГДС}}$ в большей степени зависит от величины объемной доли кислорода во вдыхаемой ГДС $C_{\text{O}_2}^{\text{вд}}$, чем от $W_{\text{CO}_2}(0)$.

Величина сброса $W^{\text{ГДС}}$ является функцией нескольких переменных:

$$W^{\text{ГДС}} = f(W_{\text{CO}_2}(0), K_d, C_{\text{O}_2}^{\text{вд}}), \quad (1)$$

где $W_{\text{CO}_2}(0)$ – отражает величину физической нагрузки; K_d – характеризует состояние испытуемого; $C_{\text{O}_2}^{\text{вд}}$ – интенсивность химической реакции в ИДА.

Величины подачи азота и диоксида углерода зависят, в свою очередь, от следующих величин:

$$W_{\text{N}_2} = f(W^{\text{ГДС}}, C_{\text{N}_2}^{\text{вд}}); \quad (2)$$

$$W_{\text{CO}_2}(0) = f(W^{\text{ГДС}}, C_{\text{CO}_2}^{\text{вд}}). \quad (3)$$

Графически зависимости (2) и (3) представлены на рис. 4, а, б и 5, а, б соответственно.

Данные для построения графиков на рис. 4, а – 5, б были получены для коэффициента дыхания $K_d = 1$, режимы испытания выбраны в соответствии с ГОСТ Р 12.4.220–2001 [4].

Для формирования пневмотахограммы, в качестве привода имитатора дыхания б, целесообразно использование линейного шагового Z-двигателя, который позволяет мгновенно изменить глубину и частоту дыхания, а также ускорение с которым происходит вдох/выдох, что позволяет адекватно имитировать различное состояние человека и стрессовые ситуации.

Блок управления IV испытательного стенда ИЛ работает по следующему алгоритму. На начальном этапе программы происходит расчет управляемых параметров исходя из заданного режима испытания, необходимых для обеспечения первоначальной подачи в систему ИЛ диоксида углерода. Работа испытательного стенда состоит из двух стадий: выход на режим и режим испытания ИДА.

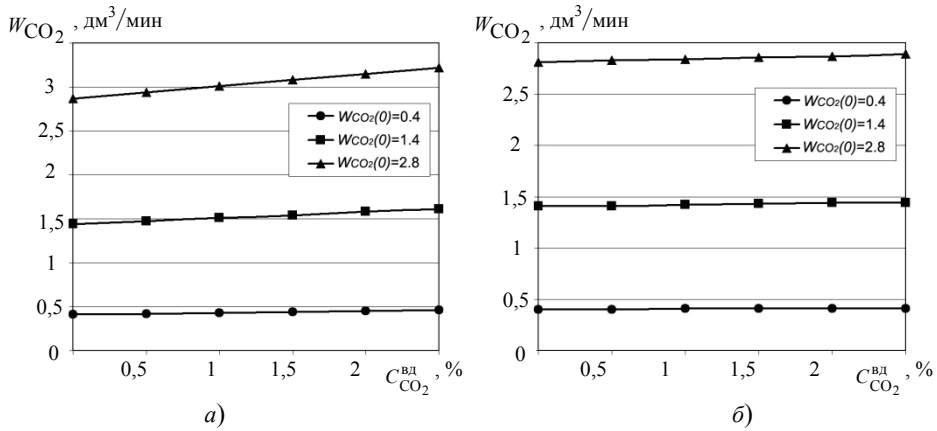


Рис. 4. Зависимость изменения W_{CO_2} при изменении $C_{CO_2}^{вд}$:

$a - C_{O_2}^{вд} = 20\%$; $b - C_{O_2}^{вд} = 95\%$

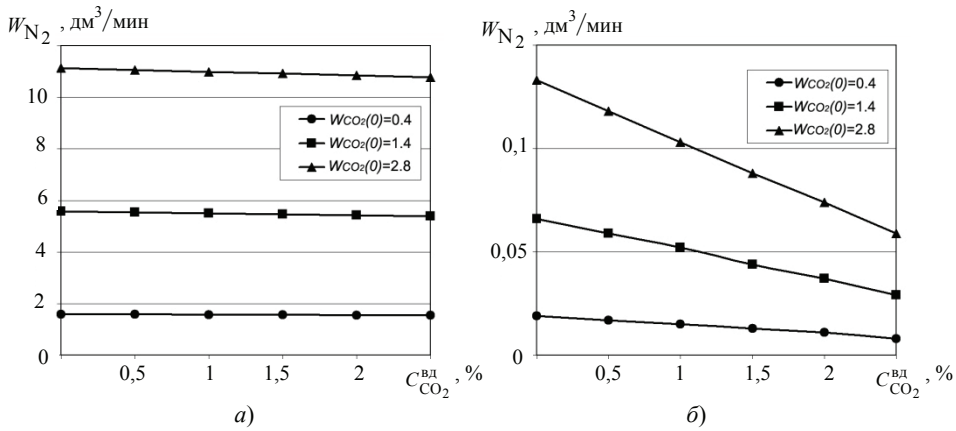


Рис. 5. Зависимость изменения W_{N_2} при изменении $C_{CO_2}^{вд}$:

$a - C_{O_2}^{вд} = 20\%$; $b - C_{O_2}^{вд} = 95\%$

При выходе на режим производится считывание данных с газоанализатора 12 о величине объемных долей газов во вдыхаемой ГДС $C_{CO_2}^{вд}$, $C_{O_2}^{вд}$. Объемная доля азота $C_{N_2}^{вд}$ рассчитывается из допущения, что в контуре ИЛ циркулирует трехкомпонентная смесь (диоксид углерода, кислород, азот). Расчет величины сброса вдыхаемой ГДС $W^{ГДС}$ из контура ИЛ производится по формуле

$$W^{ГДС} = \frac{1}{K_d} \frac{W_{CO_2}(0)}{C_{O_2}^{вд}}, \quad (4)$$

где $W_{CO_2}(0)$ и K_d определяют режим испытания (величину физической нагрузки).

Величина подачи диоксида углерода W_{CO_2} и азота W_{N_2} через управляемые клапаны 1 и 2 рассчитывается по формулам (5) и (6) соответственно:

$$W_{N_2} = \frac{C_{N_2}^{вд}}{K_d} \frac{W_{CO_2}(0)}{C_{O_2}^{вд}}; \quad (5)$$

$$W_{CO_2} = W_{CO_2}(0) \left(\frac{C_{CO_2}^{вд}}{K_d C_{O_2}^{вд}} + 1 \right). \quad (6)$$

Считывание данных с газоанализатора δ о достижении объемных долей $C_{CO_2}^{вд}$, $C_{O_2}^{вд}$ их расчетных значений, зависящих от условий испытания ИДА, определяет окончание стадии выхода на режим.

Подпрограмма регистрирует данные о температурных режимах и давлениях на линии вдоха/выдоха, а также влажности выдыхаемой ГДС и записывает их в файл, затем персональный компьютер подает сигнал о готовности стенда к работе.

Режим испытания ИДА начинается после того, как от пользователя поступает команда «запуск». Блок управления регистрирует получаемые данные с приборов через выбранный временной интервал и корректирует в соответствии с ними режим испытания. Работа программного комплекса продолжается до тех пор, пока не будут достигнуты условия окончания опыта, которые задаются на начальном этапе работы программы.

Программная реализация имитации потребления кислорода по массе на испытательном стенде ИЛ позволит: проводить испытания с минимальным вмешательством оператора; предельно быстро изменять режимы испытания в соответствии с выбранной программой испытания в ходе эксперимента; максимально точно дозировать исходные компоненты для формирования ГДС и имитировать потребление кислорода; имитировать изменение состояния человека в ходе эксперимента; автоматически регистрировать данные и прекращать эксперимент в соответствии с выбранным режимом испытания; воспроизводить кривую любой формы, описывающей процесс дыхания в зависимости от состояния человека.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 08-08-13715.

Список литературы

1. Диденко, Н.С. Регенеративные респираторы для горно-спасательных работ / Н.С. Диденко. – М. : Недра, 1990. – 160 с.
2. EN 13794:2002 Respiratory protective devices – Self-contained closed-circuit breathing apparatus for escape – Requirements, testing, marking . – Режим доступа : <http://www.cenorm.be>.
3. Холдэн, Дж. С. Дыхание / Дж.С. Холдэн, Дж.Г. Пристли. – М.-Л. : Гос. изд-во биологической и медицинской литературы, 1937. – 464 с.
4. ГОСТ Р 12.4.220–2001 Система стандартов безопасности труда. Средства индивидуальной защиты органов дыхания. Аппараты изолирующие автономные с химически связанным кислородом (самоспасатели). Общие технические требования. Методы испытаний. – Введ. 2001-08-21. М. : Изд-во стандартов, 2001. – 19 с.

Improvement of the Testing Procedure of the Chemical Oxygen Breathing Apparatus

S.V. Gudkov¹, D.S. Dvoretzkiy², A.Yu. Khromov²

Joint Stock Company "Corporation "Roshimzaschita", Tambov (1);
department «Technological Equipment and Progressive
Technologies», TSTU (2); topt@topt.tstu.ru

Key words and phrases: frequency and depth of respiration; gaseous breathing mixture; lung ventilation; self-contained breathing apparatus; simulation unit of oxygen demand; respiration parameters; respiration simulator; test rig.

Abstract: Analysis of mutual effect of the system elements "human-breathing apparatus" has been performed. Improved circuit of the test rig "Artificial lungs" that adequately simulates the person's respiration while testing the self-contained breathing apparatus has been proposed. The program realization of oxygen demand simulation by mass on the test rig "Artificial lungs" will permit to carry out the tests with minimal participation of the operator and maximally precisely dose the initial components for gaseous breathing mixture forming and simulate oxygen demand.

Vervollkommnung der Methodik der Prüfung der isolierten Atmungsapparate mit dem chemisch verbundenen Sauerstoff

Zusammenfassung: Es ist die Analyse der Zusammenwirkung der Elemente des Systems "Mensch – Atmungsapparat" durchgeführt. Es ist das verbesserte Schema des Prüfstandes "Kunstlungen", das die Atmung des Menschen bei der Prüfung der isolierten Atmungsapparate adäquat imitiert, vorgeschlagen. Die Programmrealisierung der Imitation des Verbrauchs des Sauerstoffes auf dem Prüfstand erlaubt die Untersuchungen mit der Minimaleinmischung des Operators durchzuführen, die Ausgangskomponente für die Formierung der Gasatmungsmischung zu dosieren und die Sauerstoffverbrauch zu imitieren.

Perfectionnement de la méthode des essais des appareils d'aspiration isolants avec l'oxygène lié chimiquement

Résumé: Est effectuée une analyse de l'influence des éléments du système «homme – appareil d'aspiration». Est proposé un schéma perfectionné du stand «Poumons artificiels» imitant de la manière adéquate l'aspiration humaine lors des essais des appareils d'aspiration isolants. La réalisation de l'imitation de la consommation de l'oxygène sur le stand «Poumons artificiels» permettra d'effectuer les essais avec une intervention minimale de l'opérateur et de doser au maximum les composants initiaux pour la formation du mélange gazeux d'aspiration et d'imiter la consommation de l'oxygène.

Авторы: *Гудков Сергей Владимирович* – главный конструктор индивидуальных средств защиты, начальник отдела, ОАО «Корпорация "Росхимзащита"»; *Дворецкий Дмитрий Станиславович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологическое оборудование и пищевые технологии»; *Хромов Александр Юрьевич* – аспирант кафедры «Технологическое оборудование и пищевые технологии», ГОУ ВПО «ТГТУ».

Рецензент: *Дворецкий Станислав Иванович* – доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе, заведующий кафедрой «Технологическое оборудование и пищевые технологии», ГОУ ВПО «ТГТУ».