

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО СТЕНДА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ДЫХАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ, ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ЧЕЛОВЕКА ПРИ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

С.Б. Путин, С.В. Гудков, С.Ю. Алексеев (ОАО "Корпорация "Росхимзащита"),
Д.С. Дворецкий (ГОУ ВПО "ТГТУ"), А.Ю. Хромов (ОАО "Корпорация "Росхимзащита")

Проведен анализ взаимного влияния элементов системы "человек – изолирующий дыхательный аппарат (ИДА)". Разработана схема автоматизированного испытательного стенда "Искусственные легкие" (ИЛ), в котором за счет имитации потребления кислорода существенно повышена точность воспроизведения законов дыхания.

Ключевые слова: блок имитации потребления кислорода, газовая дыхательная смесь, изолирующий дыхательный аппарат, имитатор дыхания, испытательный стенд, легочная вентиляция, частота и глубина дыхания.

Введение

Основная проблема, с которой сталкиваются разработчики средств защиты органов дыхания, необходимых при авариях и чрезвычайных ситуациях, а также медицинских установок поддержания дыхания, заключается в погрешностях имитации дыхания установки (ИЛ), применяемой при испытаниях ИДА. Методика совершенствования ИДА и конструирование автоматизированной установки ИЛ, максимально точно имитирующей дыхание человека при различных нагрузках, требует детального изучения взаимного влияния характеристик ИДА и параметров дыхания человека при различных нагрузках. Перечень параметров дыхания строго регламентирован и включает влажность, объемные доли диоксида углерода и кислорода, температуру выдыхаемой газовой дыхательной смеси (ГДС).

Основные подходы к имитации процесса дыхания человека

Целью создания автоматизированной установки ИЛ является минимизация влияния человеческого фактора при испытаниях на процесс создания техники специального и медицинского назначения. При разработке алгоритма функционирования ИЛ требуется определить перечень характеристик, описывающих процесс дыхания человека: потребление кислорода, выделение диоксида углерода, изменение величины вредного пространства, сохранение баланса азота.

Создание автоматизированной установки ИЛ предусматривает разработку блоков потребления кислорода, дозирования компонентов ГДС, поддержания влажности во выдыхаемой ГДС, системы контроля и управления. В ходе разработки алгоритма функционирования ИЛ планируется решить ряд задач, связанных с поддержанием материального и теплового балансов процесса дыхания человека и учетом времени задержки контрольно-измерительной аппаратуры.

Для испытания и совершенствования ИДА применяются динамические установки имитации дыхания ИЛ, недостаточно точно имитирующие процесс дыхания человека. Поэтому испытания ИДА в последние годы проводились на людях-добровольцах, что является дорогостоящим мероприятием. При воспроизведении процесса дыхания человека на установках ИЛ существует проблема неустойчивости массообменных процессов, так как газообмен в легких изменяется в зависимости от массы и состояния испытуемого [1]. Кроме того, один и тот же человек, выполняющий одну и ту же физическую деятельность, может иметь различную интенсивность газообмена в легких в зависимости от времени и количества принятой пищи. В связи с этим при испытаниях на людях-добровольцах затрудняется воспроизведение и статистическая оценка результатов испытания ИДА.

Настоящая работа направлена на разработку автоматизированной динамической установки имитации дыхания, учитывающей взаимное влияние параметров замкнутой системы "ИЛ – ИДА".

В процессе дыхания человек выделяет диоксид углерода и воду, а поглощает кислород (рис. 1). Известно, что при повышении объемной доли диоксида углерода во вдыхаемой ГДС, человек рефлекторно увеличивает легочную вентиляцию: например, 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%. При накоплении усталости и нагрузке постоянной степени тяжести, газообмен в легких человека также подвержен изменениям, который определяется коэффициентом дыхания (соотношение выделенного диоксида углерода к поглощенному кислороду).

Первые разрабатываемые в мире динамические установки имитации дыхания были основаны на имитации потребления кислорода путем откачивания из установки ИЛ (сброса в атмосферу) определенного объема ГДС (рис. 2), причем величина сброса не менялась в ходе испытаний.

Для повышения точности имитации потребления кислорода при дыхании в ИЛ была предложена схема (рис. 3), в которой в газобменной камере производилось сжигание жидкого или газообразного углеводородистого горючего и обеспечивалась подача дополнительного кислорода, регулирующего вели-

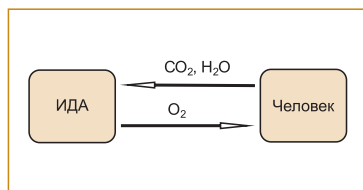


Рис. 1. Схема дыхания человека

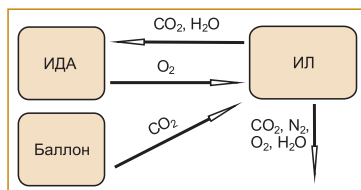


Рис. 2. Схема имитации дыхания без возмещения удаленных газов

чину коэффициента дыхания, в зону горения. При этом достигалась имитация не только потребления кислорода, но и выделения диоксида углерода и воды [2].

Следующим этапом совершенствования динамических установок имитации дыхания были ИЛ, основанные на циклическом удалении ГДС из линии вдоха и возмещением удаленных при вдохе газов (рис. 4). Эта схема также характеризуется необходимостью восполнения азота и диоксида углерода [3].

Высокая точность имитации процесса дыхания человека была достигнута в ИЛ S2000 (Sperian Protection, Франция), воспроизводящей циклы дыхания всех типов (синусоидальные, прямоугольные или реальные) и имитирующей воспроизводство диоксида углерода и удаление кислорода в соответствии с физиологическими характеристиками человека. В ИЛ S2000 в каждый момент регистрируются характеристики процесса дыхания (частота и глубина дыхания, сопротивление дыханию, легочная вентиляция), величины подачи диоксида углерода и азота. Однако в ИЛ S2000 не обеспечивается изменение коэффициента дыхания при различных нагрузках.

Анализ существующих установок имитации дыхания человека показал, что в них имеются существенные недостатки:

- установка, выполненная по схеме (рис. 2), по сравнению с испытаниями аппаратов на людях существенно искажает объемную долю кислорода в ГДС, так как при сбросе ГДС удаляется не только кислород, но также азот и диоксид углерода. Поэтому при такой схеме кислород удаляется в меньшем объеме, чем это происходит в реальных испытаниях ИДА на людях, и, следовательно, объемная доля кислорода будет превышать ту долю, которая имеет место в реальных испытаниях ИДА на людях-добровольцах;

- в схеме (рис. 3) при отборе кислорода из системы вместе с газо-воздушной смесью происходит искажение функции дыхания человека, и ее использование целесообразно лишь при наличии смесей с большим процентом содержания кислорода, так как сжиганием в ИЛ углеводородного горючего невозможно достигнуть требуемой точности отбора кислорода (в случае изменения в процессе испытаний легочной вентиляции);

- схема (рис. 4) имела достаточно высокую сложность реализации механизма потребления кислорода и в автоматизированном исполнении давала неоправданно низкую реакцию на быстрые изменения газовой концентрации во вдыхаемой ГДС из-за большого внутреннего объема.

На основе выявленных недостатков были сформулированы требования к разрабатываемой установке: имитация дыхания человека в широком диапазоне изменений коэффициента дыхания (0,7...1,2), воспроизведение любой формы кривой, описывающей дыхание человека, нагрузки различной степени тяжести от легкой (легочная вентиляция 10 дм³/мин) до

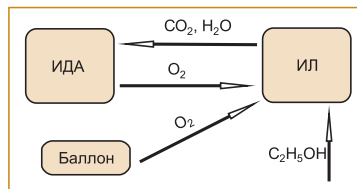


Рис. 3. Схема имитации дыхания со сжиганием углеводородного горючего

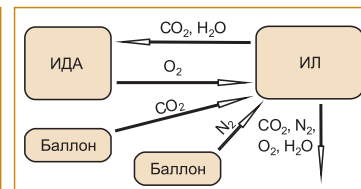


Рис. 4. Схема имитации дыхания с возмещением удаленных газов



Рис. 5. Схема применения оборудования в испытательном стенде ИЛ

тяжелой (легочная вентиляция 70 дм³/мин), а также учет взаимного влияния элементов системы "ИЛ-ИДА", аналогично влиянию человека на ИДА при дыхании в нем и ИДА на человека. При этом имитация потребления кислорода должна максимально соответствовать потреблению кислорода при дыхании человеком, что позволит корректно оценить ИДА с временем защитного действия свыше 2 ч.

С целью учета указанных особенностей процесса дыхания в ОАО "Корпорация "Росхимзащита" с участием ГОУ ВПО "Тамбовский государственный технический университет" был разработан испытательный стенд ИЛ, лишенный перечисленных недостатков.

Технические характеристики автоматизированной установки ИЛ

Частота дыхания, мин ⁻¹	5...50
Глубина дыхания, дм ³	0,3...2,5
Температура выдыхаемой ГДС, °С	(37±0,5)
Объемный расход ГДС (легочная вентиляция), дм ³ /мин	3...100
Относительная влажность выдыхаемой ГДС, %	92...100
Объемный расход диоксида углерода, дм ³ /мин	0,1...3
Продолжительности фаз и объемов вдоха и выдоха	1:1

Испытательный стенд ИЛ состоит из четырех блоков (рис. 5): подачи азота и диоксида углерода, имитатора дыхания, имитации потребления кислорода и управления.

Принцип имитации потребления кислорода аналогичен схеме, представленной на рис. 4, однако дозировка газовых компонентов ГДС и потребление кислорода осуществляются регуляторами расхода газа. При этом осуществляется автоматическое дозирование исходных компонентов ГДС, потребления кис-

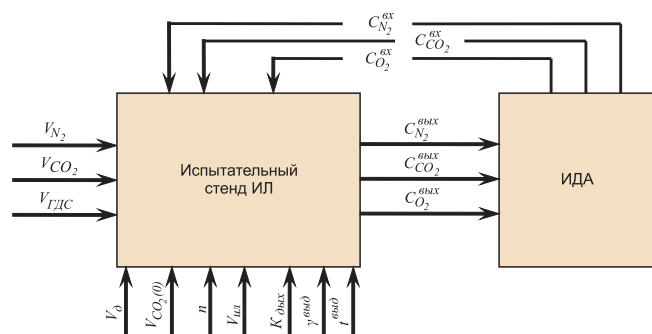


Рис. 6. Структурная схема испытательного стенда ИЛ, где входные переменные: V_{N_2} , V_{CO_2} – объемные подачи азота и диоксида углерода за такт соответственно, $m^3/такт$; $V_{ГДС}$ – объем ГДС сбрасываемой за такт, $m^3/такт$, $C_{N_2}^{вх}$, $C_{CO_2}^{вх}$, $C_{O_2}^{вх}$ – объемные доли азота, диоксида углерода и кислорода соответственно, %; выходные переменные: $C_{N_2}^{вых}$, $C_{CO_2}^{вых}$, $C_{O_2}^{вых}$ – объемные доли азота, диоксида углерода и кислорода соответственно, %; параметры дыхания: V_d – глубина дыхания, $m^3/такт$; $V_{CO_2}(0)$ – начальная объемная подача диоксида углерода, $m^3/такт$; n – частота дыхания (мин⁻¹); $V_{ИЛ}$ – внутренний объем испытательного стенда, m^3 ; $K_{дых}$ – коэффициент дыхания, $\gamma_{вых}$ – влажность выдыхаемой ГДС, %; $t_{вых}$ – температура выдыхаемой ГДС, °C

лорода и регистрация состояния ГДС в контрольных точках. Данные об объемных долях газов, температуре, влажности и сопротивлению вдоху-выдоху передаются и накапливаются в БД блока управления. В разработанной схеме предусматривается возможность варьирования коэффициента дыхания в диапазоне 0,7...1,2 в зависимости от нагрузки. Влажность выдыхаемой ГДС в ИЛ поддерживается на заданном уровне, а программное управление двигателями ИЛ позволяет воспроизводить заданные пневмотахограммы и имитировать потребление кислорода с высоким уровнем точности.

В ходе испытания ИДА на установке ИЛ величина начальной подачи диоксида углерода ($V_{CO_2}(0)$) и коэффициента дыхания ($K_{дых}$) остаются неизменными, а величины объемных долей кислорода $C_{O_2}^{вх}$ и диоксида углерода $C_{CO_2}^{вх}$ изменяются в зависимости от активности регенеративного продукта ИДА. С целью более точной имитации потребления кислорода при испытаниях ИДА величины объемных расходов диоксида углерода (V_{CO_2}) и азота (V_{N_2}), которые подаются в установку ИЛ, а также объемного расхода ГДС ($V_{ГДС}$), удаляемой из установки ИЛ, рассчитываются и корректируются каждый такт в соответствии с изменением объемных долей газов во вдыхаемой ГДС. Таким образом, в задачу настоящей работы входила разработка алгоритма регулирования сброса ГДС, подачи азота и диоксида углерода согласно значениям величин $C_{O_2}^{вх}$ и $C_{CO_2}^{вх}$ автоматически регистрируемых газоанализаторами.

Программная и аппаратная структура блока управления разрабатывалась исходя из условий, обеспечивающих функционирование быстротекущих переходных процессов и эффективного использования временных тактов работы установки для повышения качества принятых решений управления.

Использование стандартных решений для автоматизации ТП привело бы к усложнению аппаратной

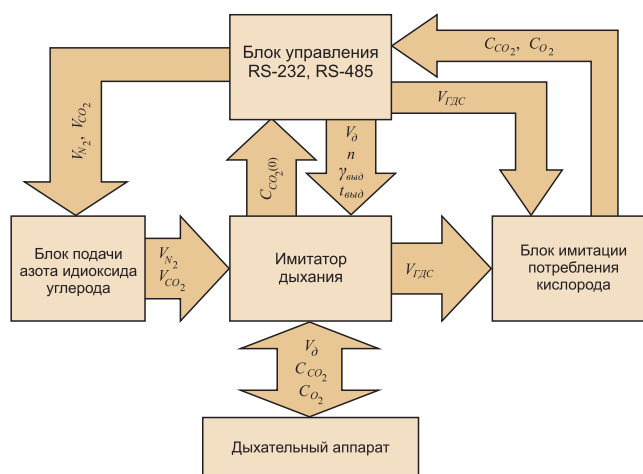


Рис. 7. Функциональная схема испытательного стенда ИЛ структуры комплекса (введение дополнительных ПЛК), затруднило бы реализацию программных и аппаратных модулей, выходящих за рамки набора для выбранной SCADA, (модуль компенсации запаздывания газоанализаторов), вызвало бы потерю производительности и росту требований к вычислительным ресурсам блока управления установкой.

Ядро разработанного ПО блока не предполагает использования специализированных ПЛК, так как в системе отсутствуют компоненты, для которых возможно на протяжении всего цикла функционирования решение локальной и автономной задачи управления, при отсутствии или минимальной связи с другими компонентами системы. Любая из решаемых в процессе работы установки ИЛ задач (регистрация данных, их анализ, выработка сигнала управления и его передача исполнительному устройству) предполагает тесное взаимодействие всех модулей программной системы и не может решаться локально с помощью только одной подсистемы. Здесь основная информационная и вычислительная нагрузка ложится на ПО, функционирующее централизованно на основном компьютере.

В блоке управления считываются данные для построения пневмотахограммы (нормальное дыхание, усталость, чихание, кашель) из БД с заданной частотой. В ходе испытания производится коррекция легочной вентиляции при изменении объемной доли диоксида углерода во вдыхаемой ГДС и дополнительно реализуется программа изменения коэффициента дыхания в зависимости от величины физической нагрузки и времени проведения испытания.

Для определения управляющих воздействий разработано математическое описание процесса дыхания в соответствии со структурной схемой установки (рис. 6) и функциональной схемой (рис. 7).

Объемная подача диоксида углерода $V_{CO_2}(0)$ имитирует выделение человеком диоксида углерода при определенной нагрузке. Величина $C_{CO_2}(0)$ определяет начальную объемную долю диоксида углерода в выдыхаемой ГДС, зависит от величины подачи диоксида углерода в начальный момент испытания, частоты и глубины дыхания, и регистрируется на линии "вы-

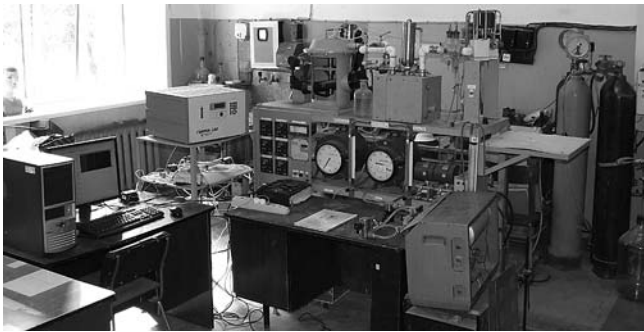


Рис. 8. Общий вид испытательного стенда ИЛ

доха" установки ИЛ, пока к ней не подключен ИДА: $C_{CO_2}(0) = f(V_{CO_2}(0), n, V\vartheta)$.

Для имитации дыхания принципиальное значение имеет правильное воспроизводство коэффициента дыхания, который определяет уровень потребления кислорода человеком, а при испытаниях на установке ИЛ задается режимом испытаний. Объемная доля азота во вдыхаемой ГДС рассчитывается исходя из допущения, что в контуре циркулирует трехкомпонентная смесь: азот, кислород и диоксид углерода. На основании принятых допущений для каждого такта вдоха-выдоха рассчитывается количество ГДС, которое необходимо удалить на фазе вдоха $V_{ГДС}$ для удаления из системы требуемого объема кислорода: $V_{ГДС} = f(V_{CO_2}(0), C_{O_2}^{вд}, K_{дых})$.

Вместе с кислородом из системы удаляется также азот и диоксид углерода. Объемный расход азота (V_{N_2} , $дм^3/мин$) и диоксида углерода (V_{CO_2} , $дм^3/мин$), которые удаляются из установки вместе с расчетным количеством кислорода для обеспечения имитации потребления кислорода, определяется исходя из их объемных долей в сбрасываемой ГДС: $V_{CO_2} = f(V_{CO_2}(0), C_{CO_2}^{вд}, C_{O_2}^{вд}, K_{дых})$; $V_{N_2} = f(V_{CO_2}(0), C_{CO_2}^{вд}, C_{O_2}^{вд}, K_{дых})$.

Указанные объемы азота и диоксида углерода требуются вернуть в систему для сохранения материального баланса по этим газам, который соблюдается при реальном использовании ИДА человеком. Расчет количества диоксида углерода и азота, которые необходимо подать в систему, ведется на основании уравнений материального баланса: это позволяет рассчитать количества отбора ГДС из системы, количества CO_2 и N_2 , которые необходимо вернуть в систему для различных режимов испытаний ИДА в соответствии с нормативными документами.

В стандартах на проведение испытаний ИДА присутствуют рекомендации по выбору схемы установки ИЛ для имитации дыхания человека. Так например, Европейский стандарт prEN 13794_2002 рекомендует проводить испытания в соответствии со схемой (рис. 4), в то время как ГОСТ Р 53260-2009 – по схеме (рис. 2). В табл. 1 приведены сравнительные характеристики установок ИЛ, рекомендуемых различными стандартами, а также разработанного испытательного стенда ИЛ (рис. 8). Таким образом, испытательный стенд ИЛ позволяет проводить испытания ИДА как по prEN 13794_2002, так и по ГОСТ Р 53260-2009, а также с учетом взаимного влияния элементов систе-

Таблица. Сравнительные характеристики имитаторов дыхания для испытания ИДА

№	Установка, разработанная в соответствии со стандартом	Коэффициент дыхания	Воспроизведение различных спирограмм и пневмотахограмм	Учет взаимного влияния элементов системы "ИЛ – ИДА"
1	prEN 13794_2002	1	Да	Нет
2	ГОСТ Р 53260-2009 (рис. 2)	1	Нет	Нет
3	Разработанный стенд ИЛ (ГОСТ Р 53260-2009, prEN 13794_2002)	0,7...1,2	Да	Да

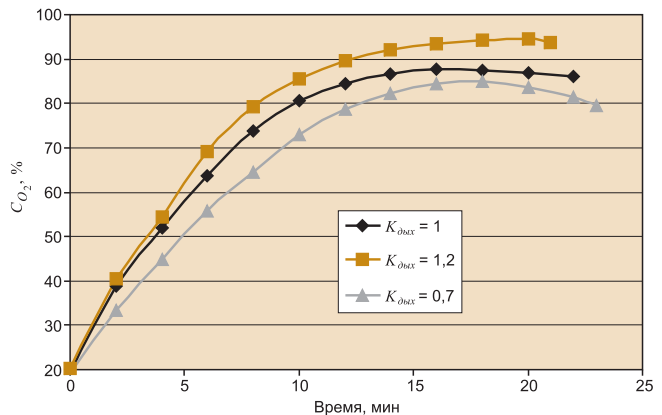


Рис. 9. Зависимость объемной доли кислорода во вдыхаемой ГДС от коэффициента дыхания

мы "ИЛ-ИДА" и воспроизведением различных спирограмм и пневмотахограмм.

Результаты испытаний ИДА на разработанной установке приведены на рис. 9–11. На рис. 9 можно проследить изменение объемной доли кислорода во вдыхаемой ГДС при изменении коэффициента дыхания в диапазоне 0,7...1,2. При уменьшении коэффициента дыхания объемная доля кислорода также уменьшается из-за сброса кислорода не только через клапан избыточного давления дыхательного мешка, но и за счет сброса ГДС из стенда ИЛ. При наименьшем значении коэффициента регенерации, характеризующим активность регенеративного продукта, разница между кривыми будет максимальна. Подача диоксида углерода и влажность одинаковы для всех трех испытаний.

На рис. 10 приведены кривые зависимости объемной доли кислорода во вдыхаемой ГДС от времени при нагрузках различной степени тяжести, коэффициенте дыхания $K_{дых} = 1$ и комнатной температуре (легкая нагрузка – легочной вентиляции $10 дм^3/мин$, средняя – $35 дм^3/мин$, тяжелая – $70 дм^3/мин$). С увеличением степени тяжести нагрузки увеличивается скорость возрастания объемной доли кислорода во вдыхаемой ГДС, что объясняется увеличением коэффициента регенерации вследствие возрастания поступающих в регенеративный патрон ИДА объемов диоксида углерода и влаги.

На рис. 11 приведены графики испытаний на разработанном испытательном стенде ИЛ, испытателе-доб-

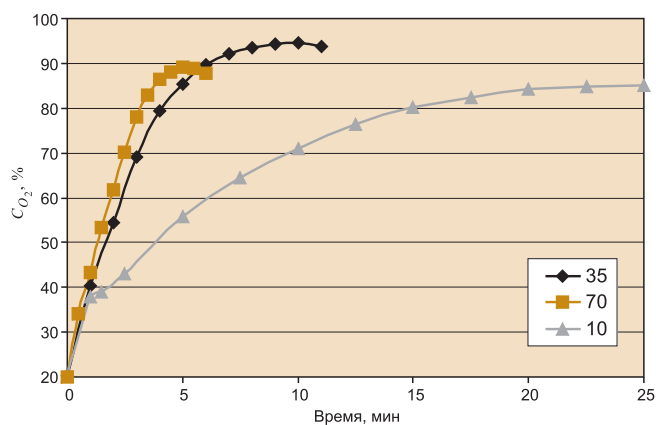


Рис. 10. Зависимость объемной доли кислорода во вдыхаемой ГДС от нагрузки различной степени тяжести (легкая – легочная вентиляция 10 дм³/мин, средняя – 35 дм³/мин, тяжелая – 70 дм³/мин соответственно)

ровольце и на установке, выполненной по схеме (рис. 2) аппарата со сбалансированной схемой регенерации.

При испытании аппарата со сбалансированной схемой регенерации (клапан избыточного давления отсутствует) вымывание азота наблюдается только при имитации потребления кислорода по схеме установки ИЛ (рис. 2), это сопровождается ростом объемной доли кислорода. Испытания на разработанном испытательном стенде ИЛ показывают, что баланс азота сохраняется, а объемная доля кислорода во вдыхаемой ГДС меняется из-за регулирования регенерации кислорода. Необходимо отметить, что при испытании такого ИДА на испытателях-добровольцах характер изменения объемной доли кислорода сходен с результатами, полученными при испытаниях на разработанном испытательном стенде ИЛ. Полученные результаты показывают, что новый испытательный стенд ИЛ дает достоверные результаты и в отличие от установки, выполненной по схеме рис. 2, не дает ложной информации о качестве ИДА. Это позволит проводить испытания ИДА с временем защитного действия свыше 2 ч, где необходимо точно оценить объемную долю кислорода во вдыхаемой ГДС.

Заключение

Разработана структура и алгоритмы функционирования испытательного стенда "Искусственные легкие", имитирующего потребление кислорода человеческим организмом в соответствии с законами дыхания. Стенд используется для контроля и проверки состояния ИДА, его возможностей обеспечивать за-

Путин Сергей Борисович – канд. техн. наук, первый зам. генерального директора,
Гудков Сергей Владимирович – канд. хим. наук, главный конструктор по индивидуальным средствам защиты,
Алексеев Сергей Юрьевич – канд. техн. наук, научный сотрудник,
Хромов Александр Юрьевич – старший научный сотрудник отдела индивидуальных средств защиты
 ОАО "Корпорация "Росхимзащита",
Дворецкий Дмитрий Станиславович – канд. техн. наук, доцент
 кафедры "Технологическое оборудование и пищевые технологии" ГОУ ВПО "ТГТУ".

Контактные телефоны: (4752) 56-06-80; 63-78-15.
 E-mail: mail@roshimzaschita.ru topt@topt.tstu.ru

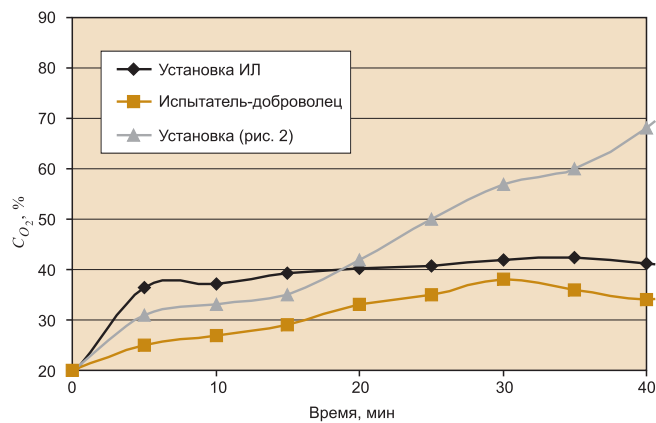


Рис. 11. Зависимость объемной доли кислорода во вдыхаемой ГДС от типа испытания

щиту человека в течение заданного времени в непригодной для дыхания атмосфере. Дальнейшее развитие стенда позволит повысить качество разработок новых фильтрующих и изолирующих ИДА за счет расширения набора воспроизводимых режимов дыхания, включая также различные заболевания дыхательной системы, и возможностей мониторинга работы ИДА за счет реализации новых эффективных методик регистрации сигналов и использования для их обработки сложных современных алгоритмов математического анализа в режиме РВ и получение устойчивых показаний состояния аппарата при наличии большого числа артефактов.

Реализация ПО ядра системы управления на основе оптимизированных временных диаграмм позволила выделить в тактах работы установки свободные кванты времени и загрузить их заданиями, направленными на повышение точности выработки сигналов управления.

При дальнейшем расширении возможностей испытательного стенда "Искусственные легкие" на основе описанной в данной работе методики он может быть использован не только разработчиками ИДА, но и службами, их эксплуатирующими, например, для проверки работоспособности партий хранящихся аппаратов.

Список литературы

1. Холдэн, Дж. С. Дыхание. М.-Л.: БИОМЕДГИЗ. 1937.
2. Диденко, Н.С. Регенеративные респираторы для горноспасательных работ. М.: Недра, 1990.
3. Kyriazi N. Development of an automated breathing and metabolic simulator. Pittsburgh, PA: U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines, IC 9110. 1986