

*В.М. Стрелец, к.т.н., доцент, НУГЗУ,
П.А. Ковалев, к.т.н., доцент, нач. каф., НУГЗУ,
П.Ю. Бородич, к.т.н., доцент, НУГЗУ*

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РАСХОДА ВОЗДУХА ПРИ РАБОТЕ СПАСАТЕЛЕЙ В АСВ

(представлено д-ром техн. наук Прохачем Э.Е.)

Допустимое время выполнения отдельных операций в непригодной для дыхания среде определяется не только показателями легочной вентиляции, которые зависят от степени тяжести работы (компонент «Человек»), но также от использования конкретного изолирующего аппарата (компонент «Машина») и условий, в которых работают спасатели (компонент «Среда»).

Ключевые слова: АСВ, легочная вентиляция, расход воздуха, режимы работы, функция распределения

Постановка проблемы. В научно-технической литературе отмечено, что время работы в средствах индивидуальной защиты органов дыхания изолирующего типа определяется легочной вентиляцией ω_n [1], значения которой для разных режимов работы приведены в нормативной [3, 4] и научно-технической [2] литературе. Однако практика использования аппаратов на сжатом воздухе (АСВ) показывает, что реальное время работы в них при проведении аварийно-спасательных работ существенно отличается от расчетного.

Анализ последних достижений и публикаций. показал, что легочная вентиляция определяется [2] количеством воздуха, который циркулирует в легких в единицу времени. Учитывая удобство пользования (поскольку на практике [3, 6] запас Q воздуха в АСВ, как правило, рассчитывают в литрах, а время t защитного действия в минутах), в качестве легочной вентиляции используется показатель

$$\omega_n = \frac{Q}{t} \quad (1)$$

с размерностью [л/мин].

Конкретные значения легочной вентиляции в [5] рекомендованы для отечественных АСВ, а в [5] – для зарубежных. При этом характер выполняемых работ не учитывается. В научно-технической [1, 7] и справочной литературе [8] приведены значения легочной вентиляции, соответствующие выполнению работ различной степени тяжести. Однако особенности расхода запаса газозооушной смеси, связанные со

спецификой работы в АСВ не рассматривались. В [9] отмечена тенденция увеличения разницы между реальными значениями легочной вентиляции и соответствующими нормативными [3, 4] значениями при увеличении тяжести выполняемой работы. Статистическая проверка данного вывода проведена в [10], где показано то, что закономерностью расхода при работе в АСВ является нормальная функция распределение рассматриваемого показателя внутри рассмотренных режимов работы. Отмечено, что при всех учебных режимах работы, включая работу в теплодымокамере, в АСВ расход воздуха выше нормативных показателей легочной вентиляции, однако и там анализ особенностей, связанных с деятельностью газодымозащитников при проведении реальных аварийно-спасательных работ, не проводился.

Постановка задачи и ее решение. Исходя из этого, поставлена задача сравнительного анализа закономерностей расхода воздуха при работе спасателей в АСВ.

Учитывая то, что в [10] обобщены результаты расхода воздуха при выполнении учебных заданий в АСВ на свежем воздухе (табл. 1) и в ТДК (табл. 2), дополнительно были проанализированы особенности, связанные с деятельностью газодымозащитников во время тактико-специальных учений (как процессов, наиболее близких к реальным аварийно-спасательным работам) на станциях глубокого залегания Харьковского метрополитена [11].

Табл. 1. Обобщенные результаты расхода воздуха в АСВ при выполнении учебных заданий на свежем воздухе [10]

Степень тяжести выполняемой работы	Нормативное значение показателя легочной вентиляции [8]	$\bar{V}_л$, л/мин.	$G_{\omega л}$, л/мин.
1	2	3	4
Покой	12	13,83	1,659
Легкая	20	24,25	2,658
Средней степени тяжести	30	39,58	5,500
Тяжелая	60	70,00	6,916
Очень тяжелая	84	95,63	6,135

Оперативная работа испытуемого личного состава в АСВ во время учений включала в себя включение в аппарат, работу с пожарно-техническим вооружением, движение к «пострадавшим» и последующую эвакуацию их на свежий воздух разными способами: сопровождение тех, кто может передвигаться, но потерял способность ориентироваться в задымленном пространстве; переноска (способом «на карабинах») тех, кто находится в сознании, но не способен передвигаться самостоятельно; переноска «потерпевших» без сознания.

Табл. 2. Обобщенные результаты расхода воздуха при работе в ТДК [10]

Задание	Степень тяжести выполняемой работы в соответствии с [8]	$\bar{\omega}_л$, л/мин.	$G_{\omega_л}$, л/мин.
1	2	3	4
Разведка	Средней тяжести	42,42	4,20
Прокладка рукавной линии к очагу пожара	Тяжелая	72,22	6,97
Вынос «пострадавшего» (в качестве последнего использовался манекен)	Очень тяжелая	87,63	6,07
Вынос «пострадавшего» (в качестве последнего использовался живой человек)	Очень тяжелая	93,86	5,28

Для анализа использовались исходные данные, приведенные в [11], где отмечено, что легочная вентиляция с уровнем значимости $\alpha=0,1$ может быть описана β -распределением. Поскольку в каждом рассматриваемом случае использовалась выборка с объемом $n=24$, полученные результаты были проверены на нормальность распределения по критерию Шапиро-Уилка [12].

Для этого, например, применительно к операции выноса «пострадавшего» без сознания по неподвижному эскалатору, как к операции, распределение расхода воздуха при выполнении которой имело наибольшее значение показателя скошенности

$$Skos = \frac{1}{n \cdot G_{\omega_л}^3} \cdot \sum_{i=1}^n (\omega_{л_i} - \bar{\omega}_л), \tag{2}$$

где $\bar{\omega}_л = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_{л_i}}{n}$ – среднее значение показателя легочной вентиляции, л/мин.;

$G_{\omega_л} = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (\omega_{л_i} - \bar{\omega}_л)^2}$ – среднеквадратическое отклонение, л/мин., вначале было рассчитано

$$n \cdot m_2 = \sum_{i=1}^n (\omega_{л_i} - \bar{\omega}_л)^2 = 63,33, \tag{3}$$

где m_2 – выборочный центральный момент второго порядка.

Поскольку оценки $\omega_{л_i}$ являются результатом обработки независимых наблюдений, они были расположены в порядке неубывания и обозначены символами $\omega_{л_1}, \omega_{л_2}, \dots, \omega_{л_{n=24}}$. В табл. 3 приведена упорядо-

ченная серия полученных значений легочной вентиляции. Это позволило вычислить промежуточную сумму S по формуле

$$S = \sum_i^k a_{n-i+1} \cdot (\omega_{л(n-i+1)} - \omega_{ли}), \quad (4)$$

где k – индекс, имеющий значения от 1 до $n/2 = 12$; a_{n-i+1} – коэффициент, имеющий специальные значения для объема выборки n (его значения, приведенные в табл. 2, взяты из табл. 10 [12]).

Табл. 3. Упорядоченная серия полученных значений легочной вентиляции при нахождении испытуемых в покое

k	$\omega_{л(24-k+1)}$	$\omega_{лк}$	$\omega_{л(24-k+1)} - \omega_{лк}$	a_{n-k+1}	$a_{n-k+1} \cdot (\omega_{л(n-k+1)} - \omega_{лк})$
1	2	3	4	5	6
1	126,6	108,18	18,42	0,4493	8,276106
2	125,68	108,88	16,80	0,3098	5,20464
3	125,54	112,62	12,92	0,2554	3,299768
4	124,9	113,62	11,28	0,2145	2,41956
5	124,17	114,07	10,10	0,1807	1,82507
6	123,41	114,73	8,68	0,1512	1,312416
7	122,81	115,8	7,01	0,1245	0,872745
8	122,61	117,03	5,58	0,0997	0,556326
9	121,95	118,49	3,46	0,0764	0,264344
10	121,9	120,86	1,04	0,539	0,56056
11	121,3	120,89	0,41	0,0321	0,013161
12	121,19	120,93	0,26	0,0107	0,002782
S					24,60748
S^2					605,528

Табл. 11 [12] для уровня значимости $\alpha=0,05$ и $n=24$ дает значение $W_{табл} = 0,916$. Поскольку статистика критерия Шапиро-Уилка

$$W = \frac{S^2}{n \cdot m_2} = 0,959 \geq W_{табл} = 0,916, \quad (5)$$

распределение в соответствии с [10] считается нормальным.

В обобщенном виде результаты анализа того, как расходуется воздух при проведении АСР на станциях метрополитена, приведены в табл. 4.

Анализ полученных результатов (табл. 4) показывает, что, несмотря на выраженную отрицательную скошенность (столбец 5 табл.4) исходных данных, полученных при выполнении каждого задания, закономерностью расхода воздуха при работе в АСВ является нормальная функция распределения рассматриваемого показателя (1) независимо от регламентируемой тяжести выполняемой работы. При этом средние

значения расхода воздуха, как и в случаях, которые были рассмотрены в [х], хуже нормируемых показателей легочной вентиляции, предлагаемых для использования в Системе стандартов по безопасности труда [4] и рекомендуемых для расчета времени работы в АСВ.

Табл. 4. Обобщенные результаты расхода воздуха при проведении АСР на станциях метрополитена

Задание	Степень тяжести выполняемой работы в соответствии с [8]	$\bar{\omega}_l$, л/мин.	G_{ω_l} , л/мин.	Skos	W
1	2	3	4	5	6
Спуск по неподвижному эскалатору	Средней тяжести ($\omega_{л\text{ норм}} \approx 40$ л/мин)	78,74	2,83	-0,60	1,09
Подъем по неподвижному эскалатору (сопровождение «пострадавшего» в сознании)	Тяжелая ($\omega_{л\text{ норм}} \approx 60$ л/мин)	90,25	2,86	-0,51	1,08
Вынос «пострадавшего» по неподвижному эскалатору на карабинах	Очень тяжелая ($\omega_{л\text{ норм}} \approx 84$ л/мин)	105,66	4,33	-0,69	0,98
Вынос «пострадавшего» без сознания по неподвижному эскалатору	Очень тяжелая ($\omega_{л\text{ норм}} \approx 84$ л/мин)	119,51	5,24	-0,75	0,96
Весь комплекс работ в непригодной для дыхания среде	Средней тяжести ($\omega_{л\text{ норм}} \approx 40$ л/мин)	99,34	3,65	-0,45	0,99

Наличие оценок математических ожиданий и среднеквадратических отклонений расхода воздуха при работе в АСВ на свежем воздухе (табл. 1), в ТДК (табл. 2) позволяет выполнить проверку того, насколько значительно различаются средние значения, полученные по независимым выборкам исследования расхода воздуха, используя *t*-критерий Стьюдента. В табл. 5 приведены результаты сравнения средних значений расхода воздуха при работе в АСВ, полученных в ТДК и во время тактико-специальных учений на станциях метрополитена. Это вызвано тем, что в [х] отмечено – в большинстве случаев при уровне значимости $\alpha=0,05$ можно говорить о совпадении значений расхода воздуха, полученных при выполнении заданий, характеризующихся одинаковой степенью тяжести, на свежем воздухе и в ТДК. То есть, стандартная нагрузка [10] достаточно адекватно отражает нагрузку, с которой сталкиваются спасатели в процессе подготовки с использованием ТДК.

Исключение составляет учебная ситуация с выносом манекена. Ее можно объяснить тем, что (как это имеет место и при проведении аварийно-спасательных работ, не связанных со спасением людей) происходит естественное чередование выполнения очень тяжелой работы с непродолжительными периодами отдыха.

Табл. 5. Сравнение значений расхода воздуха при работе в АСВ, полученных на в ТДК и во время ТСУ на станциях метрополитена

Степень тяжести выполняемой работы	F	F _{кр}	S _{ω_л}	υ	t _{набл}	t _{табл} (α = 0,05)
1	2	3	4	5	6	7
Средней тяжести (спуск по неподвижному эскалатору)	2,20	2,3	1,03	46	35,33	2,01
Тяжелая (подъем по неподвижному эскалатору)	5,94	2,3	0,65	46	11,72	2,01
Очень тяжелая (вынос «пострадавшего» по неподвижному эскалатору на карабинах)	1,49	2,3	1,39	46	8,47	2,01
Очень тяжелая (вынос «пострадавшего» по неподвижному эскалатору)	1,02	2,3	1,52	46	16,89	2,01
Средней тяжести (весь комплекс работ в непригодной для дыхания среде)	1,02	2,3	1,16	46	50,29	2,01

Вначале была рассмотрена гипотеза

$$H_0 : \bar{\omega}_l (ТСУ) = \bar{\omega}_l (ТДК) \quad (6)$$

и ее альтернатива

$$H_1 : \bar{\omega}_l (ТСУ) \neq \bar{\omega}_l (ТДК), \quad (7)$$

которая доказывает различие средних значений.

С целью выбора конкретной методики расчета t-критерия [12] вначале была проверена гипотеза о равенстве дисперсий. В качестве критерия для проверки ноль-гипотезы

$$H_0 : G^2_{\omega_l} (ТСУ) = G^2_{\omega_l} (ТДК) \quad (8)$$

был выбран F-критерий [84]

$$F = \frac{G_1^2}{G_2^2}, \quad (9)$$

где G_1^2 – большая из оценок дисперсий в двух выборках.

При этом критическое значение $F_{кр}$, которое при уровне значимости $\alpha=0,05$ и числе степеней свободы

$$\nu_{ТСУ} = n_{ТСУ} - 1 = 23, \nu_{ТДК} = n_{ТДК} - 1 = 23, \quad (10)$$

где $n_{ТСУ} = n_{ТДК} = 24$ – количество испытуемых, у которых определялся расход воздуха в АСВ, равно [12]

$$F_{кр} = F_{табл} = 2,3. \quad (11)$$

Видно (столбцы 2 и 3 табл. 5), что в рассмотренных случаях правомерной признается ноль-гипотеза (8) и допускается равенство дисперсий при выполнении работ, относящихся к одинаковой степени тяжести. Исключение составляет случай, когда сравнивается прокладка рукавной линии в ТДК и подъем по неподвижному эскалатору. Это может быть объяснено тем, что прокладка рукавной линии в ТДК ставит больше неопределенных задач и соответственно требований к газодымозащитниками (например, способности ориентироваться в замкнутом пространстве) по сравнению с подъемом по неподвижному эскалатору, когда направление движения строго задано и не представляет сложности его придерживаться.

Исходя из этого для остальных рассмотренных ситуаций, стандартная ошибка разности S_{ω_l} , с учетом того, что выборки малого размера (<30), и число степеней свободы

$$\nu = n_{ТСУ} + n_{ТДК} - 2 = 46, \quad (12)$$

осуществляется [12] следующим образом

$$S_{\omega_l} = \sqrt{\frac{(n_{ТСУ} - 1) \cdot G_{ТСУ}^2 + (n_{ТДК} - 1) \cdot G_{ТДК}^2}{n_{ТСУ} + n_{ТДК} - 2} \cdot \left(\frac{1}{n_{ТСУ}} + \frac{1}{n_{ТДК}} \right)}. \quad (13)$$

При сравнении средних значений расхода воздуха при прокладке рукавной линии в ТДК и подъеме по неподвижному эскалатору в ходе ТСУ стандартная ошибка разности рассчитывается как

$$S_{\omega_l(ТСУ-ТДК)} = \sqrt{\frac{G_{ТСУ}^2}{n_{ТСУ} - 1} + \frac{G_{ТДК}^2}{n_{ТДК} - 1}} = 0,65. \quad (14)$$

В результате

$$t_{набл} = \frac{|\bar{\omega}_л (ТСУ) - \bar{\omega}_л (ТДК)|}{S_{\omega_л}} \quad (15)$$

Видно (рис. 1), что даже выполнение работы, которая отнесена к работе средней степени тяжести (спуск по неподвижному эскалатору), не говоря уже про тяжелые и очень тяжелые работы, вызывает существенное увеличение частоты дыхания, что не может не привести к увеличению легочной вентиляции. Естественно, и реальные значения расхода воздуха в процессе проведения тактико-специальных учений существенно отличаются от рекомендованных в нормативной и справочной литературе [4, 5]. Подтверждением, этого может служить, например, существенное расхождение (рис. 1) между значениями расхода воздуха, полученными при выполнении схожих заданий в ТДК (вынос пострадавшего в «сознании») и во время ТСУ в метрополитене (вынос пострадавшего по неподвижному эскалатору на карабинах).

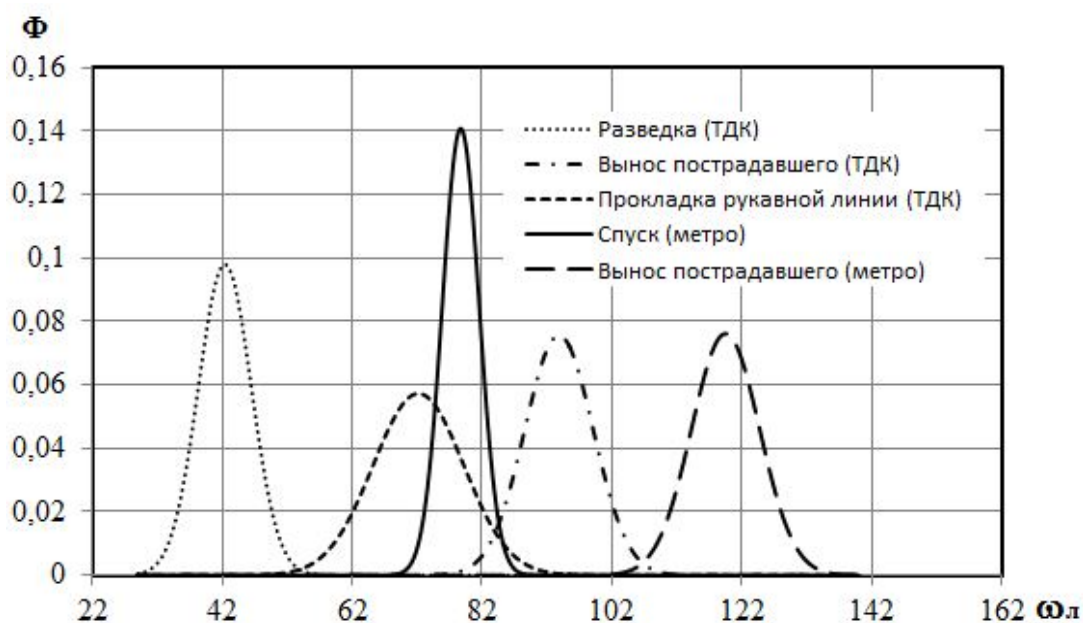


Рис. 1. Функции распределения расхода воздуха в АСВ в зависимости от характера выполняемого задания

Анализ расхождений между средними значениями расхода воздуха показывает, что расхождение между средними значениями расхода воздуха является существенным.

Кроме этого, важно отметить, что с увеличением степени тяжести операций, выполняемых в ходе проведения ТСУ, разница между расходом запаса воздуха при работе в АСВ от значений легочной вентиляции, приведенных в нормативной и научно-технической литературе [4, 5, 6], увеличивается. То есть, допустимое время выполнения от-

дельных операций в непригодной для дыхания среде определяется не только показателями легочной вентиляции, которые зависят от степени тяжести работы (компонент «Человек»), но также от использования конкретного изолирующего аппарата (компонент «Машина») и условий, в которых работают спасатели (компонент «Среда»).

Выводы. При всех режимах работы в АСВ расход воздуха выше нормативных показателей легочной вентиляции, что требует для газодымозащитников использования термина «расход воздуха» вместо «легочная вентиляция»;

Закономерностью расхода воздуха при работе в АСВ является нормальная функция распределение рассматриваемого показателя внутри рассматриваемого режима работы;

Постовой на посту безопасности наряду при расчете обязательных [4] прогнозных временных характеристик деятельности газодымозащитников в непригодной для дыхания среде (расчетные времена прекращения разведки и возвращения на свежий воздух), которые опираются на нормативные показатели легочной вентиляции, должен их постоянно корректировать;

Основное внимание должно быть уделено контролю за запасом воздуха (осуществляется в процессе проверки давления воздуха в баллонах АСВ) и постоянному уточнению контрольного давления, при котором необходимо начать возвращение.

В дальнейшем, целесообразно раскрыть закономерности расхода запаса кислорода при работе газодымозащитников в регенеративных дыхательных аппаратах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Основи створення та експлуатації апаратів на стисненому повітрі / [Ковальов П.А., Стрілець В.М., Єлізаров О.В., Безуглов О.Є.]. – Х.: АЦЗУ, 2005. – 359 с.

2. Стрілець В.М. Засоби індивідуального захисту органів дихання. Основи створення та експлуатації : Навчальний посібник / Стрілець Віктор Маркович. – Х. : АПБУ, 2001. – 118 с.

3. Настанова з організації газодимозахисної служби в підрозділах Оперативно-рятувальної служби МНС України : Наказ МНС України № 1342 від 16 грудня 2011р. : М-во надзв. сит. України, 2011. – 56 с. – (Нормативний документ МНС України. Настанова).

4. Засоби індивідуального захисту органів дихання. Методи випробування. Частина 3. Визначення опору дихання: ДСТУ EN 13274-3: 2005 – [Чинний від 2005-12-26]. – К.: Держспоживстандарт України, 2009. – 14 с.

5. Изолирующие дыхательные аппараты и основы их проектирования. Учебное пособие / [Гудков С.В., Дворецкий С.И., Путин С.Б., Таров В.П.] – М.: «Машиностроение», 2008. – 190 с.

6. Основи створення та експлуатації засобів індивідуального захисту / [Стрілець В.М., Ковальов П.А., Бородич П.Ю., Росоха С.В.] – Харків : НУЦЗУ, 2014. – 360 с.

7. Грачев В.А. Газодымозащитная служба: Учебник / В.А. Грачев, Д.В. Поповский Под общ.ред. д.т.н., профессора Мелашчина Е.А. – М.: Пожкнига, 2004. – 384 с.

8. Средства индивидуальной защиты органов дыхания. Справочное руководство / [Басманов П.И., Каминский С.Л., Коробейникова А.В., Трубицина М. Е.] – СПб.: ГИПП "Искусство России", 2002. – 400 с.

9. Бородич П.Ю. Оценка показателя легочной вентиляции для работ разной степени тяжести / П.Ю. Бородич, О.Е. Безуглов // Проблемы пожарной безопасности. Сб. науч. тр. – Харьков: НУГЗУ, 2011. – Вып. 30. – С.64-67.

10. Стрелец В.М. Раскрытие закономерностей расхода запаса воздуха при работе спасателей в аппаратах на сжатом воздухе / В.М. Стрелец, П.Ю. Бородич, П.А. Ковалев // Проблемы пожарной безопасности. Сб. науч. тр. – Харьков: НУГЗУ, 2014. – Вып. 36. – С.236–242.

11. Стрілець В.М. Закономірності діяльності рятувальників при проведенні аварійно-рятувальних робіт на станціях метрополітену: моногр. / В.М. Стрілець, П.Ю. Бородич, С.В. Росоха; НУЦЗУ. – Х.: НУЦЗУ, КП «Міська друкарня», 2012. – 112 с.

12. Статистические методы. Проверка отклонения распределения вероятностей от нормального распределения: ГОСТ Р ИСО 5479-2002. – [Действующий от 2002-07-01]. Москва: Госстандарт России, 2002. – 31 с. – (Государственные стандарты России).

В.М. Стрілець, П.А. Ковальов, П.Ю. Бородич

Порівняльний аналіз закономірностей витрати повітря при роботі рятувальників в АСП

Допустимий час виконання окремих операцій в непридатному для дихання середовищі визначається не тільки показниками легеневої вентиляції, які залежать від ступеня важкості роботи (компонент «Людина»), але також від використання конкретного ізолюючого апарату (компонент «Машина») і умов, в яких працюють рятувальники (компонент «Середовище»).

Ключові слова: АСП, легенева вентиляція, витрата повітря, режими роботи, функція розподілу.

V.M. Strelec, P.A. Kovalov, P.Yu. Borodich

Comparative analysis of the patterns of air flow during operation of rescuers in the DIA

Allowable time of certain operations in unbreathable environment depends not only on indicators of pulmonary ventilation, which depend on the severity of operation (component "Man"), but also on the use of a particular insulating device (component "Machine") and the conditions in which a lifeguard (component "Environment").

Keywords: DIA, pulmonary ventilation, air flow, modes of operation, the distribution function.