

УДК 331.101

В.М. Стрелец, П.А. Ковалев

Национальный университет гражданской защиты Украины, Харьков

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РАСХОДА КИСЛОРОДА ПРИ РАБОТЕ СПАСАТЕЛЕЙ В РЕГЕНЕРАТИВНЫХ ДЫХАТЕЛЬНЫХ АППАРАТАХ

Закономерностью расхода кислорода при работе в регенеративных дыхательных аппаратах (РДА) является нормальная функция распределение рассматриваемого показателя внутри выбранного режима работы. В большинстве случаев совпадают значения расхода кислорода, полученных при выполнении заданий, характеризующихся одинаковой степенью тяжести, на свежем воздухе и в теплодымокамере (ТДК)

Ключевые слова: РДА, расход кислорода, режимы работы, функция распределения.

Введение

Постановка проблемы. В научно-технической литературе отмечено, что время работы в регенеративных дыхательных аппаратах определяется подачей кислорода q [1], значения которой приведены в нормативной [2] и научно-технической [3] литературе. Однако практика использования регенеративных дыхательных аппаратов (РДА) показывает, что реальное время работы в процессе ликвидации чрезвычайных ситуаций может отличаться от расчетного [4].

Анализ последних достижений и публикаций показал, что в основе определения нормативного значения показателя подачи кислорода используется связь [5] между показателем легочной вентиляции $\varpi_{\text{л}}$ и дозой потребления кислорода человеком

$$q = \varpi_{\text{л}} \cdot (S_{\text{вд}} - S_{\text{выд}}) = 0,0455 \cdot \varpi_{\text{л}}, \quad (1)$$

где $S_{\text{вд}} \approx 0,2095$ – доля кислорода во вдыхаемом воздухе; $S_{\text{выд}} \approx 0,164$ – доля кислорода в выдыхаемом, который выдыхается.

В то же время, существенное отличие показателей расхода воздуха при работе спасателей в аппаратах на сжатом воздухе от значений легочной вентиляции, приведенных в научно-технической литературе [6, 7], ставит вопрос и об исследовании того, как на практике расходуется кислород при работе спасателей в РДА.

Постановка задачи. Исходя из этого, поставлена задача сравнительного анализа закономерностей расхода кислорода при выполнении спасателями в РДА разных работ.

Изложение основного материала

Экспериментальные исследования были проведены аналогично тому, как это было сделано при исследовании расхода воздуха в аппаратах на сжатом воздухе [6, 7]. Значение показателя расхода кислорода с размерностью [л/мин] в соответствии с законом Бойля-Мариотта рассчитывалось как

$$q = \frac{Q}{\Delta t} = \frac{(P_{\text{нач}} - P_{\text{кон}}) \cdot V_0}{\Delta t \cdot P_a}, \quad (1)$$

где Q – количество израсходованного за рассматриваемый промежуток Δt времени работы [мин] в аппарате, л; $P_{\text{нач}}$ – начальное давление в баллоне РДА, МПа; $P_{\text{кон}}$ – конечное давление, МПа; $P_a \approx 0,1$ МПа – атмосферное давление; V_0 – объем баллона, л (в рассматриваемом случае $V_0 = 1$ л, поскольку при проведении экспериментов использовался регенеративный дыхательный аппарат КИП-8 [5]).

Полученные результаты по каждому виду работ, поскольку в соответствующем случае использовалась выборка с объемом $n=24$, были проверены на нормальность распределения по критерию Шапиро-Уилка [8]. Для этого, например, применительно к выполнению испытуемыми очень тяжелой работы (табл. 1) вначале были рассчитаны среднее значение показателя расхода кислорода

$$\bar{q} = \sum_{i=1}^n q_i / n, \quad (2)$$

где q_i – значение показателя расхода кислорода у i -го испытуемого, л/мин.;

среднеквадратическое отклонение

$$G_q = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})^2}, \quad (3)$$

и

$$n \cdot m_2 = \sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})^2 = 63,33, \quad (4)$$

где m_2 – выборочный центральный момент второго порядка.

Поскольку оценки q_i являются результатом обработки независимых наблюдений, они были расположены в порядке неубывания и обозначены символами $q_1, q_2, \dots, q_{n=24}$. В табл. 2 приведена упорядоченная серия полученных значений расхода кисло-

рода. Это позволило вычислить промежуточную сумму S по формуле:

$$S = \sum_i^k a_{n-i+1} \cdot (q_{(n-i+1)} - q_i) = 3,00, \quad (5)$$

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 [8]).

Таблица 1

Результаты оценки расхода кислорода при выполнении испытуемыми очень тяжелой работы

| Испытуемый | $P_{нач}$ | $P_{кон}$ | V_6 | t | q | $(q_i - \bar{q})^2$ |
|---------------|-----------|-----------|-------|---|------|---------------------|
| 1 | 19,75 | 18,00 | 1 | 5 | 3,50 | 0,0729 |
| 2 | 19,50 | 18,25 | 1 | 5 | 2,50 | 1,6129 |
| 3 | 18,75 | 16,50 | 1 | 5 | 4,50 | 0,5329 |
| 4 | 18,75 | 17,00 | 1 | 5 | 3,50 | 0,0729 |
| 5 | 19,25 | 17,50 | 1 | 5 | 3,50 | 0,0729 |
| 6 | 18,25 | 16,25 | 1 | 5 | 4,00 | 0,0529 |
| 7 | 18,00 | 15,75 | 1 | 5 | 4,50 | 0,5329 |
| 8 | 19,00 | 17,25 | 1 | 5 | 3,50 | 0,0729 |
| 9 | 20,00 | 18,00 | 1 | 5 | 4,00 | 0,0529 |
| 10 | 18,50 | 17,25 | 1 | 5 | 2,50 | 1,6129 |
| 11 | 19,50 | 17,75 | 1 | 5 | 3,50 | 0,0729 |
| 12 | 19,25 | 17,25 | 1 | 5 | 4,00 | 0,0529 |
| 13 | 19,75 | 17,50 | 1 | 5 | 4,50 | 0,5329 |
| 14 | 20,00 | 18,25 | 1 | 5 | 3,50 | 0,0729 |
| 15 | 19,00 | 17,00 | 1 | 5 | 4,00 | 0,0529 |
| 16 | 19,75 | 17,85 | 1 | 5 | 3,80 | 0,0009 |
| 17 | 18,25 | 16,25 | 1 | 5 | 4,00 | 0,0529 |
| 18 | 19,50 | 17,25 | 1 | 5 | 4,50 | 0,5329 |
| 19 | 18,25 | 16,50 | 1 | 5 | 3,50 | 0,0729 |
| 20 | 18,75 | 16,75 | 1 | 5 | 4,00 | 0,0529 |
| 21 | 18,75 | 16,50 | 1 | 5 | 4,50 | 0,5329 |
| 22 | 18,50 | 17,25 | 1 | 5 | 2,50 | 1,6129 |
| 23 | 18,75 | 16,50 | 1 | 5 | 4,50 | 0,5329 |
| 24 | 18,25 | 16,25 | 1 | 5 | 4,00 | 0,0529 |
| \bar{q} | | | | | 3,77 | |
| σ_q | | | | | 0,63 | |
| $n \cdot m_2$ | | | | | 8,91 | |

Таблица 2

Упорядоченная серия полученных значений легочной вентиляции при нахождении испытуемых в покое

| k | $q_{(24-k+1)}$, л/мин | q_k , л/мин | $q_{(24-k+1)} - q_k$, л/мин | a_{n-k+1} | $a_{n-k+1} \cdot (\omega_{л(n-k+1)} - \omega_{лк})$ |
|-------|------------------------|---------------|------------------------------|-------------|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | 4,5 | 2,5 | 2,00 | 0,4493 | 0,8986 |
| 2 | 4,5 | 2,5 | 2,00 | 0,3098 | 0,6196 |
| 3 | 4,5 | 2,5 | 2,00 | 0,2554 | 0,5108 |
| 4 | 4,5 | 3,5 | 1,00 | 0,2145 | 0,2145 |
| 5 | 4,5 | 3,5 | 1,00 | 0,1807 | 0,1807 |
| 6 | 4,5 | 3,5 | 1,00 | 0,1512 | 0,1512 |
| 7 | 4 | 3,5 | 0,50 | 0,1245 | 0,06225 |
| 8 | 4 | 3,5 | 0,50 | 0,0997 | 0,04985 |
| 9 | 4 | 3,5 | 0,50 | 0,0764 | 0,0382 |
| 10 | 4 | 3,5 | 0,50 | 0,539 | 0,2695 |
| 11 | 4 | 3,8 | 0,20 | 0,0321 | 0,00642 |
| 12 | 4 | 4 | 0,00 | 0,0107 | 0 |
| S | | | | | 3,00162 |
| S^2 | | | | | 9,009723 |

Табл. 1 [8] для уровня значимости $\alpha=0,05$ и $n=24$ дает значение $W_{\text{табл}} = 0,916$. Поскольку

$$W = 1,011 \geq W_{\text{табл}} = 0,916, \quad (6)$$

распределение в соответствии с [8] считается нормальным.

Экспериментальные результаты расхода кислорода с учетом степени тяжести выполняемой работы, внешних условий и характера выполняемой работы в обобщенном виде представлены в табл. 3, где показатель легочной вентиляции \bar{v}_l рассчитывался из (1).

Анализ результатов, приведенных в табл. 3, позволил предположить равенство значений подачи кислорода при нахождении газодымозащитников в покое, а также при выполнении легких работ и работ средней тяжести. Кроме этого, целесообразно проверить равенство средних значений подачи кислорода при выполнении работ средней степени тяжести и всего комплекса работ в ТДК, поскольку в [5] принимается, что в целом при работе в РДА работа относится к средней степени тяжести, а также подачу кислорода при выносе пострадавшего в ТДК с подачей при выполнении очень тяжелых работ.

Таблица 3

Обобщенные результаты экспериментальных исследований

| Степень тяжести выполняемой работы (характер задания) | Нормативное значение [9] показателя подачи кислорода, л/мин. | \bar{q} , л/мин. | σ_q , л/мин. | Skos | \bar{v}_l , л/мин. |
|---|--|--------------------|---------------------|-------|----------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Покой | 0,55 | 1,40 | 0,18 | 0,07 | 30,8 |
| Легкая | 0,91 | 1,40 | 0,16 | 0,58 | 30,8 |
| Средней тяжести | 1,37 | 1,42 | 0,19 | 0,55 | 31,2 |
| Тяжелая | 2,73 | 2,79 | 0,36 | 0,07 | 61,3 |
| Очень тяжелая | 3,82 | 3,77 | 0,63 | -0,83 | 82,9 |
| Весь комплекс работ в ТДК | 1,37 | 1,98 | 0,28 | 0,52 | 43,5 |
| Вынос «пострадавшего» из ТДК | 3,82 | 2,55 | 0,48 | 0,46 | 56,0 |

Для сравнения показателей расхода кислорода при выполнении в РДА разных видов работ (табл. 4) рассматривалась гипотеза

$$H_0 : q_1 = q_2 \quad (7)$$

и ее альтернатива

$$H_1 : q_1 \neq q_2, \quad (8)$$

которая доказывает различие средних значений.

С целью выбора конкретной методики расчета t-критерия [10] вначале была проверена гипотеза о равенстве дисперсий.

В качестве критерия для проверки ноль-гипотезы

$$H_0 : \sigma_{q_1}^2 = \sigma_{q_2}^2 \quad (9)$$

был выбран F-критерий

$$F = \sigma_1^2 / \sigma_2^2, \quad (10)$$

где σ_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

$$\nu_q = n_q - 1 = 23, \quad (11)$$

где $n_q = 24$ – количество испытуемых, у которых определялся расход кислорода в РДА при выполнении каждого рассматриваемого вида работ, равно [10].

$$F_{кр} = F_{\text{табл}} = 2,3. \quad (12)$$

Видно (столбцы 2 и 3 табл. 2), что в рассмотренных случаях правомерной признается ноль-гипотеза (7) и допускается равенство дисперсий при выполнении работ, относящихся [3] к одинаковой степени тяжести.

Таблица 4

Сравнение значений расхода кислорода при работе в РДА, полученных на свежем воздухе и в ТДК

| Характер сравниваемых работ | F | $F_{кр}$ | S_{ω_l} | ν | $t_{\text{набл}}$ | $t_{\text{табл}} (\alpha = 0,05)$ |
|--|------|----------|----------------|-------|-------------------|-----------------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Покой – средней тяжести | 0,90 | 2,3 | 0,053 | 46 | 0,37 | 2,01 |
| Средней тяжести – весь комплекс работ в ТДК | 0,46 | 2,3 | 0,069 | 46 | 8,11 | 2,01 |
| Тяжелая – вынос «пострадавшего» из ТДК | 0,56 | 2,3 | 0,122 | 46 | 1,96 | 2,01 |
| Очень тяжелая – вынос «пострадавшего» из ТДК | 1,72 | 2,3 | 0,162 | 46 | 7,55 | 2,01 |

Исходя из этого, стандартная ошибка разности S_q , с учетом того, что выборки малого размера (<30), и число степеней свободы ν при вычислении t -критерия рассчитываются [10] таким образом

$$S_q = \sqrt{\frac{(n_1 - 1) \cdot \sigma_1^2 + (n_2 - 1) \cdot \sigma_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \cdot \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}; \quad (13)$$

$$n_1 + n_2 - 2 = 46. \quad (14)$$

В результате

$$t_{\text{набл}} = |q_1 - q_2| / S_q. \quad (15)$$

Видно (столбцы 6 и 7 табл. 2), что в большинстве случаев при уровне значимости $\alpha=0,05$ можно говорить о совпадении значений расхода кислорода, полученных при выполнении заданий, характери-

зующихся одинаковой степенью тяжести, на свежем воздухе и в ТДК. Это свидетельствует о том, что стандартная нагрузка [3] 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.

В обобщенном виде функции распределения расхода кислорода в РДА с комбинированной подачей могут быть представлены в виде, приведенном на рис. 1.

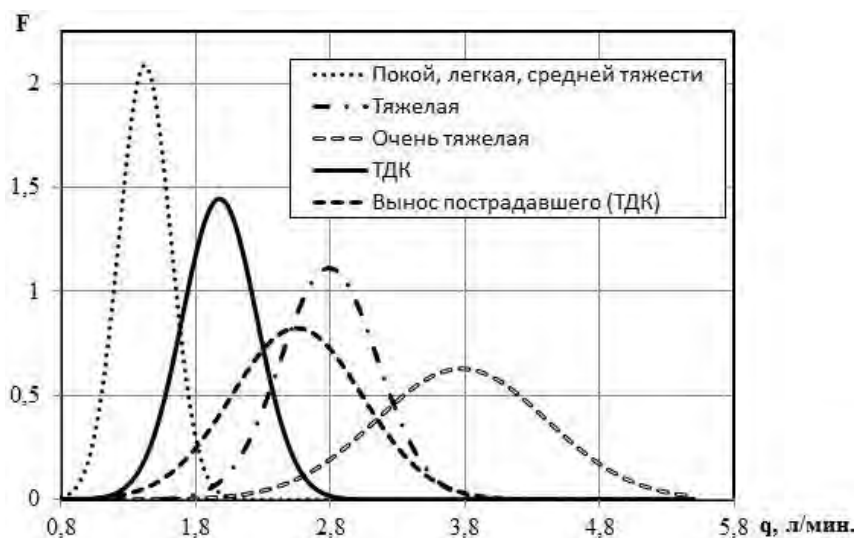


Рис. 1. Функции распределения расхода кислорода в РДА

Видно, что при нахождении в покое, а также выполнении работ легких и средней степени тяжести можно считать, что подача кислорода может рассматриваться равной 1,4 л/мин., что, учитывая комбинированную подачу [5] кислорода в используемой при проведении исследований модификации РДА типа КИП-8 фактически соответствует постоянной подаче редуктора [9]. В то же время, при выносе пострадавшего из ТДК, который, как предполагалось, соответствует выполнению очень тяжелой работы, подача кислорода фактически соответствовала той, которая должна быть при выполнении тяжелой работы. Это может быть объяснено тем, что газодымозащитники, использующие РДА, хорошо знают об очень хороших характеристиках этих аппаратов (по времени защитного действия) по сравнению с АСВ, и могут позволить себе чередование выполнения очень тяжелой работы (переноски пострадавшего) с паузами отдыха. Аналогичная ситуация имеет место и в случае рассмотрения всего комплекса работ в ТДК, когда происходит чередование тяжелых работ с паузами отдыха.

Аналогичная ситуация (рис. 1) имеет место и в процессе использования РДА при проведении аварийно-спасательных работ на станциях метрополитена. В [4, 11] показано, что в этом случае для всего комплекса работ плотность распределения подачи кислорода имеет вид

$$f(q_{\Sigma}) = \frac{1}{0,09 \cdot \sqrt{2} \cdot \pi} \cdot e^{-\frac{(q-1,98)^2}{2 \cdot 0,09^2}}, \quad (15)$$

где $\bar{q}_{\Sigma} \approx 1,98$ л/мин – математическое ожидание подачи кислорода в РДА при выполнении всего комплекса аварийно-спасательных работ на станциях метрополитена; $\sigma_{q_{\Sigma}} \approx 0,09$ л/мин. – среднеквадратическое отклонение подачи кислорода в РДА при выполнении всего комплекса аварийно-спасательных работ на станциях метрополитена; а для подъема пострадавшего без сознания:

$$f(q') = \frac{1}{0,13 \cdot \sqrt{2} \cdot \pi} \cdot e^{-\frac{(q-2,6)^2}{2 \cdot 0,13^2}}, \quad (16)$$

где $\bar{q}' \approx 2,6$ л/мин – математическое ожидание подачи кислорода в РДА при подъеме пострадавшего без сознания; $\sigma_{q'} \approx 0,13$ л/мин. – среднеквадратическое отклонение подачи кислорода в РДА при подъеме пострадавшего без сознания.

Полученные результаты показывают, что РДА обеспечивают более экономное расходование запаса газовой смеси не только за счет использования конструктивных особенностей таких аппаратов, но и в результате того, что при поверхностном дыхании, характерном при выполнении тяжелых работ, сокращается количество углекислого газа, от которого необходимо очистить воздух в регенеративном патроне аппарата.

Выводы

Особенностью расхода кислорода при использовании регенеративных дыхательных аппаратов является то, что рассматриваемый показатель с 5%-ым уровнем значимости описывается нормальной функцией распределения для всех режимов работы газодымозащитников. При этом подача кислорода в РДА равна:

– при нахождении в покое, а также выполнении работ легких и средней степени тяжести 1,4 л/мин;

– при выполнении всего комплекса работ в непригодной для дыхания среде 2 л/мин, что соответствует расходу газовой смеси в 40 л/мин, а при выносе пострадавшего 2,6 л/мин – легочной вентиляции при выполнении тяжелой работы (60 л/мин).

Список литературы

1. *Основи створення та експлуатації апаратів на стисненому повітрі* / П.А. Ковальов, В.М. Стрілець, О.В. Єлізаров, О.Є. Безуглов. – Х.: АЦЗУ, 2005. – 359 с.
2. *Настанова з організації газодымозахисної 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).*

3. *Засоби індивідуального захисту органів дихання. Автономні резервуарні дихальні апарати зі стисненим повітрям. Вимоги, випробування, маркування: ДСТУ EN 137:2002 – [Чинний від 2003-05-10]. – К.: Держспоживстандарт України, 2003. – 55 с.*

4. *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.*

5. *Основи створення та експлуатації засобів індивідуального захисту* / В.М. Стрілець, П.А. Ковальов, П.Ю. Бородич, С.В. Росоха. – Х.: НУЦЗУ, 2014. – 360 с.

6. *Стрілець В.М. Сравнительный анализ закономерностей расхода запаса воздуха при работе спасателей в аппаратах на сжатом воздухе* / В.М. Стрілець // *Збірник наукових праць Харківського університету повітряних сил.* – 2014. – № 4 (41). – С. 150-153.

7. *Стрілець В.М. Раскрытие закономерностей расхода запаса воздуха при работе спасателей в аппаратах на сжатом воздухе* / В.М. Стрілець, П.А. Ковальов, П.Ю. Бородич // *Проблемы пожарной безопасности.* – 2014. – №36. – С. 236-242. – Режим доступа: http://nuczu.edu.ua/sciencearchive/ProblemsOfFireSafety/vol36/strelec_borodich_tarahno.pdf.

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

9. *Изолирующие дыхательные аппараты и основы их проектирования: учеб. пособ. / С.В. Гудков, С.И. Дворецкий, С.Б. Путин, В.П. Таров. – М.: Машиностроение, 2008. – 190 с.*

10. *Халафян А.А. STATISTICA 6 Статистический анализ данных* / А.А. Халафян. – М.: Бином-Пресс, 2007. – 512 с.

11. *Бородич П.Ю. Закономерности деятельности в системе "спасатель – экстремальная среда" на станциях метрополитена: дис. ... канд. техн. наук: 05.01.04 / Павел Юрьевич Бородич. – Х., 2009. – 217 с.*

Поступила в редколлегию 9.09.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.В. Росоха, Национальный университет гражданской защиты Украины, Харьков.

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ РОЗХОДУ ЗАПАСУ ПОВІТРЯ ПРИ РОБОТІ РЯТУВАЛЬНИКІВ В РЕГЕНЕРАТИВНИХ ДИХАЛЬНИХ АПАРАТАХ

В.М. Стрілець, П.А. Ковальов

Закономірністю витрати кисню під час роботи в регенеративному дихальному апараті є нормальна функція розподілу показника, що розглядається, всередині обраного режиму роботи. В більшості випадків співпадають показники витрати кисню, отримані під час виконання вправ, що характеризуються однаковим ступенем важкості, на свіжому повітрі та в тепломістокамері.

Ключові слова: РДА, розхід кисню, режими роботи, функції розподілу.

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE LAWS OF CONSUMPTION OF OXYGEN IN THE RESCUE IN REGENERATIVE BREATHING APPARATUS

V.M. Strelec, P.A. Kovalev

Regularities of oxygen consumption when operating in regenerative breathing apparatus is a normal function of the distribution of this indicator within the selected mode. In most cases, the same flow rate of oxygen produced when performing tasks characterized by the same degree of severity, the fresh air and in a smoky educational complex.

Keywords: regenerative breathing apparatus, oxygen consumption modes, the distribution function.