

2.10.1 Пожарная безопасность (технические науки)

Научная статья

УДК 004.023 : 614.842

Комплексная оценка функционального состояния газодымозащитников в условиях теплового стресса

Максим Олегович Баканов¹

Борис Борисович Гринченко²

Дмитрий Юрьевич Захаров³

¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия

^{2,3}Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, Иваново, Россия

¹<https://orcid.org/0000-0002-5427-8767>,

²<https://orcid.org/0000-0003-1759-2308>,

³<https://orcid.org/0009-0007-7511-3842>

Автор, ответственный за переписку: Борис Борисович Гринченко,
grinchenko.borya@mail.ru

Аннотация. Представлена комплексная оценка влияния температуры окружающей среды и нормированных физических нагрузок на функциональное состояние газодымозащитников. В ходе эксперимента в термокамере при 20°C, 25°C и 30°C газодымозащитники-добровольцы в количестве n=40 человек выполняли пять ступеней нагрузки на беговой дорожке под углом наклона G=1. Мощность выполняемой работы варьировалась в диапазоне от 35 до 171 Вт, в зависимости от ступени. Регистрировались частота сердечных сокращений (ЧСС) и сатурация крови кислородом (SpO₂). Установлено, что повышение температуры до 30°C при экстремальной нагрузке вызывает рост ЧСС до 196±6 уд·мин⁻¹ и снижение SpO₂ до 91,0±0,6 %. Выявлен нелинейный характер прироста ЧСС: каждый дополнительный 1°C при легкой работе увеличивает пульс на 0,7 уд·мин⁻¹, а при тяжелой – на 1,1 уд·мин⁻¹. Полученные количественные зависимости могут быть использованы при тренировке газодымозащитников и в практической деятельности при условии внедрения систем телеметрии физиологических показателей, позволяющих в реальном времени контролировать ЧСС и SpO₂ и своевременно корректировать время эффективной работы в дыхательных аппаратах для предотвращения теплового удара у личного состава.

Ключевые слова: газодымозащитник, частота сердечных сокращений, сатурация крови, тепловой стресс, физическая нагрузка, дыхательный аппарат, безопасность жизнедеятельности

Для цитирования: Баканов М.О., Гринченко Б.Б., Захаров Д.Ю. Комплексная оценка функционального состояния газодымозащитников в условиях теплового стресса.

Original article

Comprehensive assessment of the functional state of firefighters under heat stress conditions

Maxim O. Bakanov¹

Boris B. Grinchenko²

Dmitry Y. Zakharov³

¹National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

^{2,3}Ivanovo Fire and Rescue Academy of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Ivanovo, Russia

¹<https://orcid.org/0000-0002-5427-8767>

²<https://orcid.org/0000-0003-1759-2308>,

³<https://orcid.org/0009-0007-7511-3842>

Corresponding author: Boris B. Grinchenko, grinchenko.borya@mail.ru

Abstract. The article presents a comprehensive assessment of the impact of ambient temperature and standardized physical activity on the functional state of firefighters. During the experiment, 40 volunteer firefighters performed five load stages on a treadmill at an inclination angle of $G=1$ in a heat chamber at 20 °C, 25 °C, and 30 °C. The power of the performed work varied from 35 to 171 W, depending on the stage. Heart rate (HR) and blood oxygen saturation (SpO_2) were recorded. It was found that an increase in temperature to 30°C during extreme exercise causes an increase in HR to 196 ± 6 bpm⁻¹ and a decrease in SpO_2 to 91.0 ± 0.6 %. A nonlinear nature of the HR increase was revealed: every additional 1 °C during light work increases the heart rate by 0.7 bpm⁻¹, and during heavy work – by 1.1 bpm⁻¹. The obtained quantitative relationships can be used in the training of gas and smoke protection personnel and in practical activities, provided that telemetry systems for physiological indicators are implemented, allowing for real-time monitoring of heart rate and SpO_2 and timely adjustment of the effective work time in breathing apparatus to prevent heat stroke in personnel.

Keywords: firefighters, heart rate, blood saturation, heat stress, physical activity, breathing apparatus, life safety

For citation: Bakanov M.O., Grinchenko B.B., Zakharov D.Yu. Comprehensive assessment of the functional state of firefighters under heat stress.

Введение

Профессиональная деятельность газодымозащитников в непригодной для дыхания среде (НДС) сопряжена с воздействием комплекса экстремальных факторов. К числу таких факторов относятся высокая температура окружающей среды, значительная масса носимого снаряжения (достигающая 45 кг) и интенсивная физическая нагрузка [5, 6]. Сочетанное воздействие указанных факторов приводит к быстрому напряжению кардиореспираторной системы, развитию тахикардии, снижению SpO_2 и повышению риска теплового удара [7, 8].

Современные мета-анализы подтверждают, что физиологический стресс у пожарных обусловлен, не только весом дыхательного аппарата со сжатым воздухом (ДАСВ), но и комплексным тепловым воздействием [5]. Установлено, что в условиях высокой температуры ЧСС может возрастать на 40% по сравнению с показателями в умеренной среде [6]. Экспериментальные данные также свидетельствуют о том, что ношение ДАСВ способно

снижать максимальное потребление кислорода до 30%, что неизбежно отражается на SpO_2 и общей переносимости нагрузок [8].

Несмотря на наличие нормативных документов, регламентирующих работу звеньев газодымозащитной службы (ГДЗС), в них не отражены количественные критерии оценки сочетанного влияния теплового стресса и физической нагрузки на функциональное состояние организма [1, 2]. Исследования, посвященные изучению режимов труда и отдыха, показывают, что у значительной части газодымозащитников со сниженными функциональными резервами при повторных нагрузках наблюдаются признаки декомпенсации [9]. Конструктивные особенности дыхательных аппаратов и эргономика их размещения также вносят вклад в субъективное восприятие тяжести работы и физиологическую цену деятельности [7].

Таким образом, целью настоящего исследования является количественная оценка динамики ЧСС и SpO_2 у газодымозащитников при комбинированном воздействии температуры окружающей среды и нормированных физических нагрузок.

Методика экспериментального исследования

Экспериментальная часть работы выполнялась на базе Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России в период с 2023 по 2025 год. В исследовании приняли участие 40 газодымозащитников-добровольцев, чьи антропометрические и физиологические характеристики (представлены в виде $M \pm \sigma$, где M – среднее арифметическое, σ – среднее квадратичное отклонение) приведены в Табл.1. Все участники прошли предварительный медицинский осмотр и дали информированное согласие на участие в эксперименте.

Табл.1. Антропометрические и физиологические характеристики газодымозащитников ($n = 40$, $M \pm \sigma$)

Параметр	Значение
Возраст, лет	23,5±6,4
Рост, м	1,80±0,05
Масса тела, кг	75,5±8,8
Индекс массы тела, $кг/м^2$	23,2±2,2
ЖЕЛ, л	5,6±0,7
МПК, $мл \cdot кг^{-1} \cdot мин^{-1}$	52,8±7,8

Исследование проводилось в термокамере при трех температурных режимах:

- комфортном (20 ± 1 °C);
- умеренно нагревающим (25 ± 1 °C);
- выраженно нагревающим (30 ± 1 °C).

Относительная влажность воздуха во всех режимах поддерживалась на уровне 40-50%, что позволяло минимизировать ее влияние как дополнительного фактора.

Физическая нагрузка задавалась на беговой дорожке и соответствовала пяти ступеням мощности (далее – W_1 , W_2 , W_3 , W_4 , W_5) рассчитанным по методике, учитывающей массу тела и имитацию дополнительного снаряжения [3]:

- W_1 (легкая разведка): $35,4 \pm 5,8$ Вт;
- W_2 : $69,3 \pm 9,8$ Вт;
- W_3 : $103,2 \pm 13,8$ Вт;
- W_4 : $137,1 \pm 17,7$ Вт;
- W_5 (экстремальная нагрузка): $171,1 \pm 21,7$ Вт.

Продолжительность каждой ступени составляла 4 минуты с последующим 1-минутным интервалом для регистрации показателей.

В ходе эксперимента регистрировались следующие физиологические параметры:

- ЧСС ($\text{уд} \cdot \text{мин}^{-1}$) – непрерывно с помощью нагрудных пульсометров Polar H10;
- SpO2 (%) – пульсоксиметрами Pulse Oximeter на последней минуте каждой ступени нагрузки.

При этом следует отметить, что расход воздуха ($\text{л} \cdot \text{мин}^{-1}$) из дыхательных аппаратов в данном исследовании не регистрировался, поэтому прямых данных для пересчета физиологических показателей во время защитного действия дыхательных аппаратов не получено. Оценка защитного действия требует отдельных исследований с прямым измерением легочной вентиляции.

Статистическая обработка включала расчет $M \pm \sigma$. Достоверность различий оценивалась с применением t-критерия Стьюдента для связанных выборок. Различия считались статистически значимыми при уровне $p < 0,05$. Схема эксперимента представлена на Рис.1.

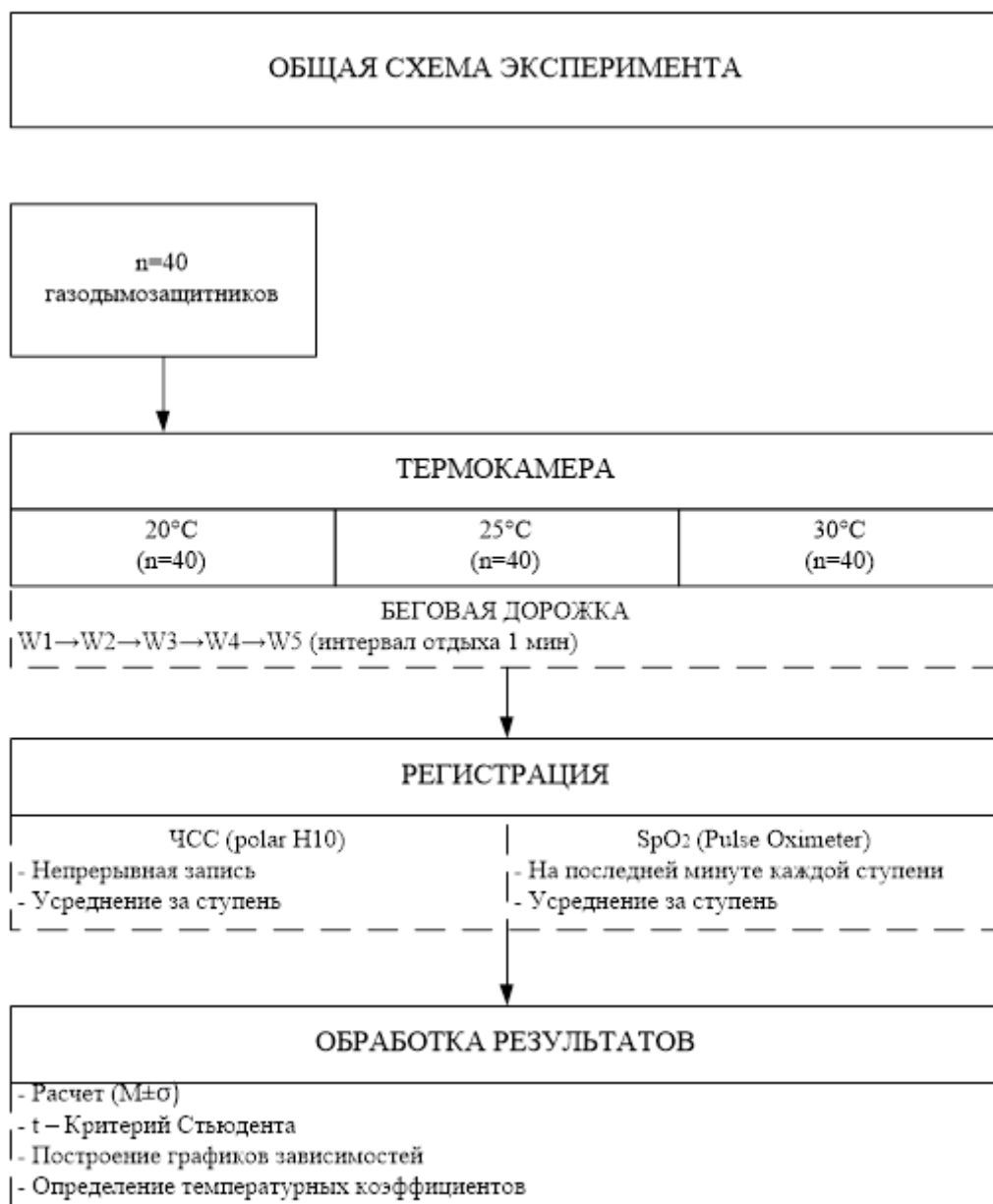


Рис.1. Схема эксперимента

Результаты и их обсуждение

ЧСС рассматривается в физиологии труда как интегральный показатель функционального напряжения сердечно-сосудистой системы. Результаты измерений данного параметра представлены в Табл.2 и на Рис.2.

**Табл.2. Средние значения частоты сердечных сокращений (уд·мин⁻¹, M±σ)
на различных ступенях нагрузки при разных температурах**

Температура, °C		W ₁ (35,4 ± 5,8 Вт)	W ₂ (69,3 ± 9,8 Вт)	W ₃ (103,2 ± 13,8 Вт)	W ₄ (137,1 ± 17,7 Вт)	W ₅ (171,1 ± 21,7 Вт)
20	ЧСС	108±6	115±6	138±8	173±5	185±5
25		110±7	125±6	144±8	179±7	193±6
30		115±9	132±5	147±6	181±7	196±6

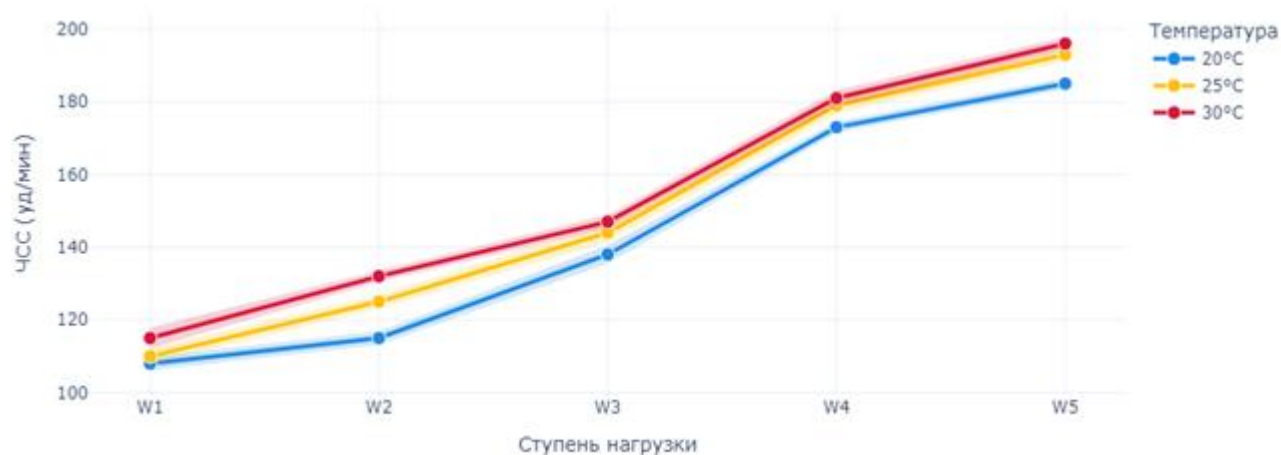


Рис.2. Динамика ЧСС при различных температурах и нагрузках

Анализ полученных данных позволяет заключить, что увеличение механической мощности выполняемой работы закономерно сопровождается ростом ЧСС. Помимо этого, отчетливо проявляется моделирующее влияние температуры окружающей среды. При экстремальной нагрузке (степень W₅) повышение температуры с 20 до 30°C приводит к статистически значимому приросту ЧСС на 11 уд·мин⁻¹ (с 185 ± 5 до 196 ± 6 уд·мин⁻¹), что соответствует увеличению на 5,9 % ($p < 0,05$).

Полученные результаты согласуются с данными Bruce-Low и соавторов [6], которые наблюдали увеличение ЧСС у пожарных на учебных полигонах до 39,8% при сочетанном воздействии тепла и физической нагрузки. Примечательно, что прирост ЧСС в расчете на 1°C повышения температуры носит нелинейный характер. На легких нагрузках (W₁) он составляет приблизительно 0,7 уд·мин⁻¹, тогда как при экстремальных нагрузках (W₅) возрастает до 1,1 уд·мин⁻¹ (Рис.3).

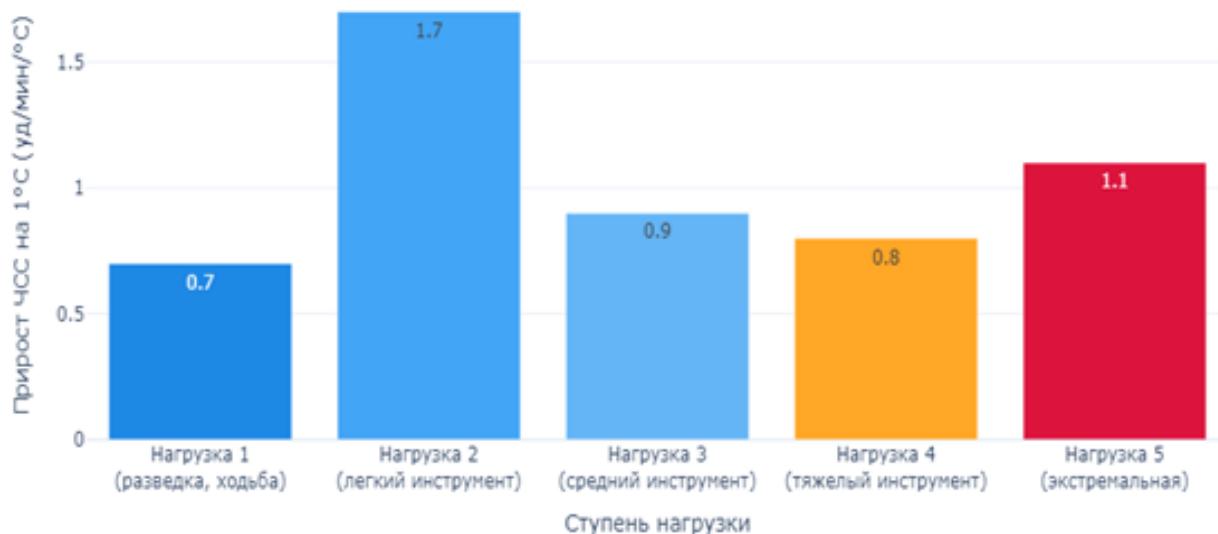


Рис.3. Температурный коэффициент прироста ЧСС (уд·мин⁻¹ на 1°C)

Данное явление может быть объяснено конкуренцией терморегуляторного и мышечного кровотока, что требует дополнительной работы сердца для одновременного обеспечения как мышечного сокращения, так и процессов теплоотдачи [10]. Указанный феномен подтверждается выводами Li и соавторов [5] о том, что физиологический стресс при работе в ДАСВ определяется именно комбинацией факторов, а не изолированным влиянием массы снаряжения.

Сатурация крови кислородом представляет собой неинвазивный показатель, отражающий эффективность газообмена в легких и адекватность кислородного обеспечения тканей организма. Результаты измерений данного параметра представлены в Табл.3 и на Рис.4.

Табл.3. Средние значения SpO₂ (%), M±σ на различных ступенях нагрузки при разных температурах

Температура, °C		W ₁ (35,4 ± 5,8 Вт)	W ₂ (69,3 ± 9,8 Вт)	W ₃ (103,2 ± 13,8 Вт)	W ₄ (137,1 ± 17,7 Вт)	W ₅ (171,1 ± 21,7 Вт)
20	SpO ₂	96,8±0,8	96,8±0,6	96,3±0,7	94,3±0,8	91,9±0,5
25		96,5±0,8	96,4±0,8	96,3±0,9	94,0±0,8	91,7±0,6
30		96,5±0,8	96,2±0,7	96,1±0,7	92,8±0,8	91,0±0,6

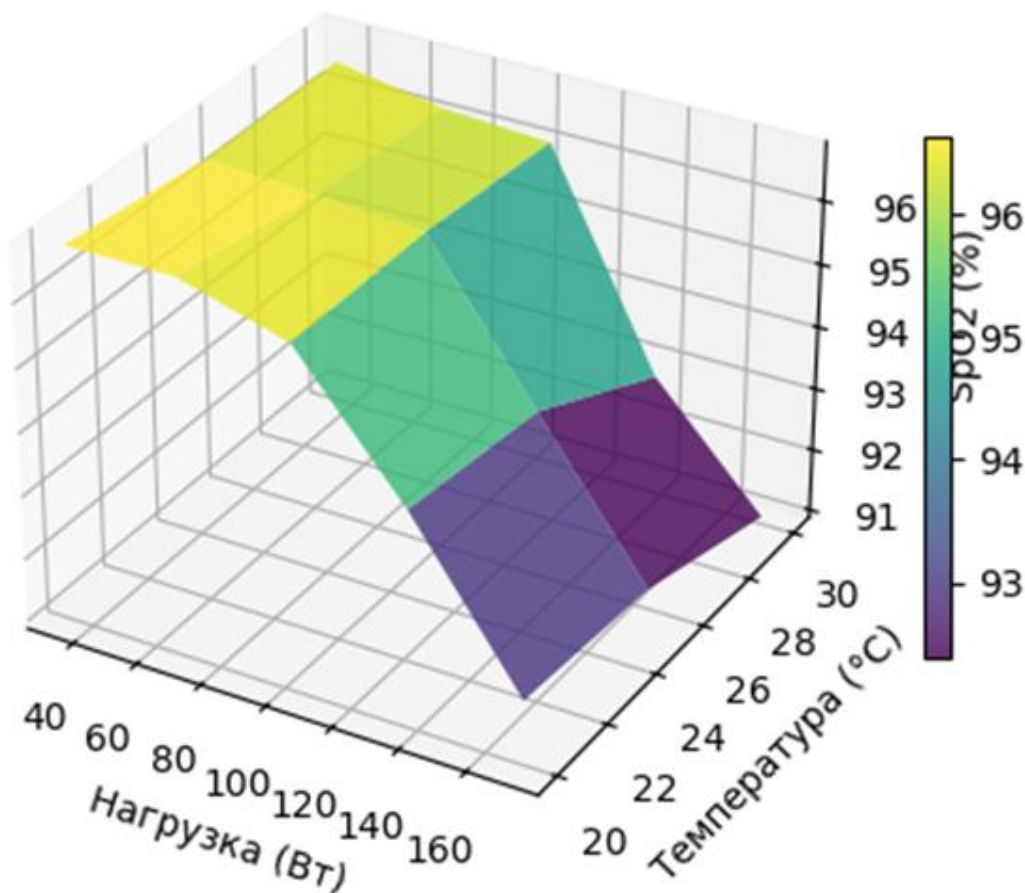


Рис.4. Трехмерная визуализация SpO_2 при вариации температуры и мощности нагрузки

В комфортных температурных условиях ($20^{\circ}C$) при возрастании нагрузки до экстремальной (W_5) наблюдается снижение SpO_2 с $96,8 \pm 0,8 \%$ до $91,9 \pm 0,5 \%$. Данная тенденция объясняется увеличением потребления кислорода работающими мышцами и возможным развитием вентиляционно-перфузионного дисбаланса. Исследования Dreger и соавторов [8] показывают, что ношение дыхательных аппаратов может снижать максимальное потребление кислорода до 30 %, что непосредственно отражается на наблюдаемом падении сатурации.

Повышение температуры окружающей среды до $30^{\circ}C$ усугубляет явления гипоксемии. На ступени W_5 сатурация снижается до $91,0 \pm 0,6 \%$, что на 0,9 % ниже показателя, зарегистрированного при $20^{\circ}C$ ($p < 0,05$). Снижение SpO_2 ниже 92 % на фоне выраженной тахикардии (превышающей $190 \text{ уд} \cdot \text{мин}^{-1}$) может рассматриваться как маркер декомпенсации функционального состояния [1] и служить объективным критерием для принятия решения о прекращении выполнения боевой задачи или смене звена ГДЗС.

На тепловой карте (Рис.5) наглядно представлено распределение значений SpO_2 в зависимости от температуры окружающей среды и нагрузки. Зоны критических значений (ниже 92 %) выделены красным цветом.

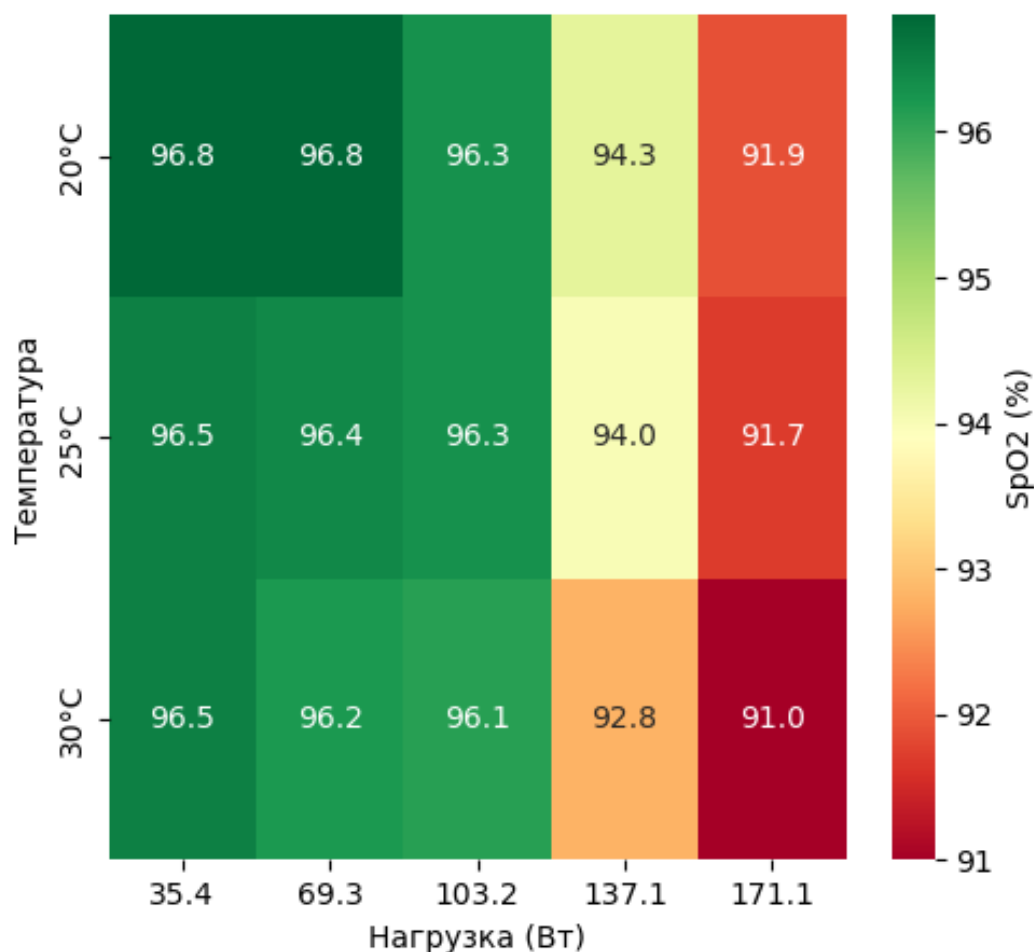


Рис.5. Тепловая карта сатурации крови (SpO_2 , %)

Особого внимания заслуживает тот факт, что у 37 % испытуемых со сниженными показателями физической подготовленности, согласно данным Kesler и соавторов [9], наблюдались признаки декомпенсации при повторных нагрузках. Это подтверждает необходимость индивидуализированного подхода к оценке функционального состояния газодымозащитников [7].

Однако следует подчеркнуть, что выявленные количественные закономерности между температурой среды, мощностью нагрузки, ЧСС и SpO_2 могут быть непосредственно применены в боевой обстановке только при наличии у командира звена ГДЗС оперативной телеметрической информации о физиологическом состоянии каждого газодымозащитника. Без такой системы рекомендации остаются сугубо методическими, пригодными для тренировок и пост-событийного анализа, но не для реального времени принятия решений.

Заключение

Проведенное экспериментальное исследование позволило получить количественные характеристики функционального состояния газодымозащитников при комбинированном

воздействии повышенной температуры окружающей среды и нормированных физических нагрузок.

1. Установлено, что прирост ЧСС в зависимости от температуры носит нелинейный характер и составляет от $0,7 \text{ уд} \cdot \text{мин}^{-1}$ на 1°C при легких нагрузках до $1,1 \text{ уд} \cdot \text{мин}^{-1}$ на 1°C при экстремальных нагрузках. Полученные дифференцированные значения могут быть использованы для прогнозирования кардиоваскулярного стресса у личного состава в различных условиях оперативной обстановки.

2. Выявлено, что повышение температуры окружающей среды до 30°C в сочетании с тяжелой физической работой мощностью 171 Вт приводит к снижению сатурации крови кислородом до $91,0 \pm 0,6 \%$, что указывает на повышенный риск развития гипоксии. Данный показатель может служить объективным критерием для ограничения времени непрерывной работы в ДАСВ.

3. Подтвержден эффект усиления кардиоваскулярного ответа при сочетанном действии теплового стресса и мышечной работы, что требует обязательного учета при нормировании нагрузок и планировании времени работы звеньев ГДЗС. Данный эффект находит подтверждение в современных мета-аналитических исследованиях [5] и экспериментальных работах [6, 9].

4. Полученные зависимости ЧСС и SpO_2 от температуры окружающей среды и мощности выполняемой работы могут быть рекомендованы для включения в ведомственные нормативные документы в качестве дополнительных физиологических критериев при оценке предельно допустимых состояний газодымозащитников (угроза теплового удара, декомпенсация гипоксии). Расчет же времени защитного действия дыхательных аппаратов должен по-прежнему основываться на прямых измерениях расхода воздуха или давления в баллоне, поскольку полученные в данной работе физиологические показатели (ЧСС, SpO_2) не являются прямыми аналогами легочной вентиляции.

5. В настоящее время процедура допуска личного состава к работе в экстремальных температурных условиях как отдельный регламентированный этап – отсутствует в ведомственных нормативных документах. Полученные данные о значительных индивидуальных различиях в переносимости теплового стресса (по показателям МПК, ЖЕЛ, динамике ЧСС и SpO_2) обосновывают целесообразность разработки и внедрения такой процедуры. В качестве первичных критериев для дифференцированного допуска могут быть предложены: исходный уровень МПК ($< 45 \text{ мл} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{мин}^{-1}$), величина прироста ЧСС на 1°C ($> 1,1 \text{ уд} \cdot \text{мин}^{-1}$) и скорость десатурации SpO_2 на нагрузках $W_4 - W_5$ [4, 8, 9].

6. Практическая реализация полученных количественных зависимостей ЧСС и SpO_2 для оперативной корректировки времени работы звеньев ГДЗС в условиях реального пожара невозможна без разработки и широкого внедрения систем телеметрии физиологических показателей газодымозащитников. Существующие штатные средства контроля не учитывают индивидуальную физиологическую стоимость нагрузки. Перспективным направлением является создание телеметрических комплексов с пороговой сигнализацией при достижении критических значений ($\text{ЧСС} > 190 \text{ уд} \cdot \text{мин}^{-1}$, $\text{SpO}_2 < 92 \%$).

7. Ограничение исследования. В работе оценивались только ЧСС и SpO_2 . Расход воздуха из дыхательных аппаратов не измерялся, поэтому полученные характеристики не могут быть непосредственно использованы для расчета времени защитного действия дыхательных аппаратов. Для перехода к практике требуется отдельное исследование связи физиологических показателей с легочной вентиляцией.

Список источников

1. Баканов, М.О. Ресурсно-эргономическая модель оценки эффективности работы звеньев газодымозащитной службы в непригодной для дыхания среде / М.О. Баканов, Б.Б. Гринченко, Д.Ю. Захаров // Безопасность жизнедеятельности. – 2025. – № 10(298). – С. 28-39. – EDN PGMPON.

2. Баканов, М.О. Влияние теплового стресса на эффективность боевых действий пожарных: экспериментальные исследования микроклиматических условий. Постановка задачи / М.О. Баканов, Д.Ю. Захаров // Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации: Материалы IX международной научно-практической конференции. В 2-х частях, Москва, 19-20 марта 2024 года. – Москва: Академия Государственной противопожарной службы, 2024. – С. 81-85. – EDN FIHBSI.

3. Анализ влияния физической нагрузки на организм газодымозащитников в условиях термонеutralной температуры воздуха / М.О. Баканов, Д.Ю. Захаров, А.В. Суравегин [и др.] // Современные проблемы гражданской защиты. – 2024. – № 2(51). – С. 5-17. – EDN JNTBGM.

4. Гринченко, Б.Б. Автоматизированная система управления безопасностью при работах на пожарах в непригодной для дыхания среде / Б.Б. Гринченко, Д.В. Тараканов // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2018. – № 4. – С. 32-36. – DOI 10.25257/FE.2018.4.32-36. – EDN YZOMVV.

5. Li J. et al. Quantifying self-contained breathing apparatus on physiology and psychological responses during firefighting: a systematic review and meta-analysis // International journal of occupational safety and ergonomics. – 2023. – Т. 29. – №. 1. – С. 77-89.

6. Bruce-Low S.S., Cotterrell D., Jones G. E. Effect of wearing personal protective clothing and self-contained breathing apparatus on heart rate, temperature and oxygen consumption during stepping exercise and live fire training exercises // *Ergonomics*. – 2007. – Т. 50. – №. 1. – С. 80-98.

7. Bakri I. et al. Effects of firefighters' self-contained breathing apparatus' weight and its harness design on the physiological and subjective responses // *Ergonomics*. – 2012. – Т. 55. – №. 7. – С. 782-791.

8. Dreger R. W., Jones R. L., Petersen S. R. Effects of the self-contained breathing apparatus and fire protective clothing on maximal oxygen uptake // *Ergonomics*. – 2006. – Т. 49. – №. 10. – С. 911-920.

9. Kesler R. M. et al. Physiological response to firefighting activities of various work cycles using extended duration and prototype SCBA // *Ergonomics*. – 2018. – Т. 61. – №. 3. – С. 390-403.

10. Wasserman K. Principles in exercise testing and interpretation // *Principles in exercise testing and interpretation*. – 1994.

References

1. Bakanov, M.O. Resource-ergonomic model for assessing the performance of gas and smoke protection service units in an environment unsuitable for breathing / M.O. Bakanov, B.B. Grinchenko, D.Yu. Zakharov // *Life Safety*. - 2025. – Vol. 10 (298). – Pp. 28-39. – EDN PGMPON.

2. Bakanov, M.O. The Impact of Heat Stress on the Efficiency of Firefighting Operations: Experimental Studies of Microclimatic Conditions. Statement of the Problem / M.O. Bakanov, D.Yu. Zakharov // *Fire Fighting: Problems, Technologies, Innovations: Proceedings of the IX International Scientific and Practical Conference*. In 2 parts, Moscow, March 19-20, 2024. – Moscow: Academy of the State Fire Service, 2024. – Pp. 81-85. – EDN FIHBSI.

3. Analysis of the influence of physical activity on the body of gas and smoke protection workers under conditions of thermoneutral air temperature / M.O. Bakanov, D.Yu. Zakharov, A.V. Surovegin [et al.] // *Modern problems of civil defense*. – 2024. – Vol. 2 (51). – Pp. 5-17. – EDN JNTBGM.

4. Grinchenko, B.B. Automated safety management system for work on fires in an environment unsuitable for breathing / B.B. Grinchenko, D.V. Tarakanov // *Fires and emergencies: prevention, liquidation*. – 2018. – Vol. 4. – Pp. 32-36. – DOI 10.25257 / FE.2018.4.32-36. – EDN YZOMVV.

5. Li J. et al. Quantifying self-contained breathing apparatus on physiology and psychological responses during firefighting: a systematic review and meta-analysis // *International journal of occupational safety and ergonomics*. – 2023. – Vol. 29. – №. 1. – Pp. 77-89.

6. Bruce-Low S.S., Cotterrell D., Jones G. E. Effect of wearing personal protective clothing and self-contained breathing apparatus on heart rate, temperature and oxygen consumption during stepping exercise and live fire training exercises // *Ergonomics*. – 2007. – Vol. 50. – №. 1. – Pp. 80-98.
7. Bakri I. et al. Effects of firefighters' self-contained breathing apparatus' weight and its harness design on the physiological and subjective responses // *Ergonomics*. – 2012. – Vol. 55. – №. 7. – Pp. 782-791.
8. Dreger R. W., Jones R. L., Petersen S. R. Effects of the self-contained breathing apparatus and fire protective clothing on maximal oxygen uptake // *Ergonomics*. – 2006. – Vol. 49. – №. 10. – Pp. 911-920.
9. Kesler R. M. et al. Physiological response to firefighting activities of various work cycles using extended duration and prototype SCBA // *Ergonomics*. – 2018. – Vol. 61. – №. 3. – Pp. 390-403.
10. Wasserman K. Principles in exercise testing and interpretation // *Principles in exercise testing and interpretation*. – 1994.

Информация об авторах

М.О. Баканов – профессор, доктор технических наук, доцент, советник РААСН

Б.Б. Гринченко – доцент, кандидат технических наук, доцент

Information about the author

M.O. Bakanov – Professor, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Advisor to the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences

B.B. Grinchenko – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.