

канд. техн. наук **Болибрух Б.В. / Bolibrukh B.V.**¹
канд. техн. наук **М. Хмель / M. Chmiel**²
магистр инж. **Ю. Мазур / Yu. Mazur**³

Przyjęty/Accepted/Принята: 18.08.2015;

Zrecenzowany/Reviewed/Рецензирована: 01.03.2016;

Opublikowany/Published/Опубликована: 31.03.2016;

Модель теплового состояния пожарного в защитной одежде⁴

A Model of a Firefighter's Thermal Condition when Attired in Protective Clothing

Model stanu cieplnego ciała strażaka w ubraniu ochronnym

АННОТАЦИЯ

Введение: Работа пожарного при тушении пожаров сопряжена с большим риском для жизни и здоровья. Тепловое воздействие и физические нагрузки при этом часто граничат с предельными уровнями для человека и материалов теплозащитной одежды пожарного (ТЗОП) или превышают их что приводит к перегреву или ожогам пожарного. Для увеличения безопасности работы крайне важно знать предельное время работы пожарного (ПВРП) в тех или иных условиях тушения пожаров и не допустить его превышения. Это предельное время зависит от таких факторов, как характеристики ТЗОП (количество, материал и толщина слоев), температура, влажность и скорость обдува костюма окружающим воздухом, а также тяжести выполняемой нагрузки.

Цель: Целью данной работы является разработка и верификация расчетной тепловой модели пожарного в теплозащитной одежде при различных условиях тепловых воздействий для прогнозирования и анализа теплового состояния и определения предельного времени работы пожарного.

Методы: Совместное моделирование теплового состояния человека и теплозащитной одежды, в которой он работает, даст возможность анализировать большое количество условий работы пожарного, а также факторов влияющих на его тепловое состояние. Такое моделирование позволяет определять максимальную продолжительности работы пожарного в тех или иных условиях, а также проводить оптимальное проектирование конфигурации новой теплозащитной одежды. При этом будет возможно анализировать уровень комфортных и предельных температур тела человека, который в среднем лежит в диапазоне 37,2-38°C. Такое моделирование позволит также уменьшить количество дорогостоящих натуральных испытаний материалов защитной одежды в различных диапазонах параметров среды и характере работ пожарного при тушении пожаров.

Результаты: Представлены результаты экспериментальных исследований теплового режима подкостюмного пространства волонтеров, выполняющих физические упражнения разной тяжести, которые были использованы для верификации представленной модели.

Сравнение результатов экспериментальных измерений температуры тела волонтеров, одетых в теплозащитную одежду и выполняющих работу при комнатной температуре и разных степенях тяжести, с результатами модельных расчетов, показали их близость (расхождение не более 2°C).

Выводы: Разработана двухмерная модель теплообмена тела пожарного в защитном костюме учитывающая основные тепловые процессы и механизмы терморегуляции при различных уровнях физических нагрузок, а именно внутреннее тепловыделение, переменную проводимость тканей, теплоотвод потоотделением и дыханием.

Ключевые слова: охрана труда, тепловое состояние пожарного в теплозащитной одежде, моделирование, экспериментальное исследование

Вид статьи: оригинальная научная работа

ABSTRACT

Aim: The purpose of this study is to develop and verify a mathematical model, which identifies the thermal condition of a firefighter whilst wearing heat protective clothing at different temperature levels. The model is intended for predicting and analyzing the thermal condition of the body and determination of a firefighter's maximum operating endurance.

Introduction: The work of a firefighter is accompanied by considerable risk to health and life. Effects from heat and physical exertion often

¹ Львовский государственный университет безопасности жизнедеятельности / Lviv State University of Life Safety; bolibrukh@ukr.net; вклад в создание статьи / percentage contribution – 40%;

² Государственная Центральная школа Государственной пожарной службы в городе Ченстохова / Central School of the State Fire Service in Czestochowa; вклад в создание статьи / percentage contribution – 40%;

³ Научно-Исследовательский Центр Противопожарной Охраны – Государственный Исследовательский Институт / Scientific and Research Centre for Fire Protection – National Research Institute; вклад в создание статьи / percentage contribution – 20%;

⁴ Эту статью наградила Редакционный Совет / This article was recognised by the Editorial Committee;

reach critical limits of human endurance. Similarly, materials used in protective clothing may become ineffective beyond certain parameters. Consequently, exposure beyond such parameters leads to overheating of the body and causes burns. In order to increase the firefighter's operational safety, it is important to know endurance limits for specified operating conditions, within which a firefighter is expected to perform and not exceed such limits. The time constraint is dependent on a range of factors, such as: characteristics of heat protective clothing (amount, type of material used and thickness of layers), temperature, humidity, speed of airflow surrounding the clothing and work load.

Methods: The simultaneous modelling of a firefighter's body temperature and clothing intended to protect from the effects of heat, allows for an evaluation of many aspects relating to the work of a firefighter and factors which influence the thermal condition of his/her body. This kind of modelling facilitates the determination of a firefighter's maximum performance duration in given circumstances and to develop a configuration of new clothing providing protection against the effect of heat. Simultaneously, it is possible to analyze comfort levels and parameter limits for human body temperatures, which on average range within 37,2–38°C. Additionally, modelling will enable a reduction in the number of expensive tests for textile content of protective clothing, performed for different environmental conditions and nature of work of a firefighter during operations.

Results: Reported study results relating to temperature levels in spaces beneath layers of protective clothing for volunteers taking part in research, who performed physical exercises of varying intensity, were utilised to verify the proposed model. Body temperature test results, for volunteers attired in protective clothing and engaged in physical activity at room temperature of varying degrees, were very close to the results obtained from model calculations. Variations did not exceed 2°C.

Conclusion: The study facilitated the development of a two dimension model revealing the heat exchange in protection clothing, taking into account thermal processes and thermoregulation mechanisms of the human body, at different physical exertion levels, including internal heat release, permeability of textiles, and heat dissipation through breathing and perspiration.

Keywords: safety at work, thermal condition of a firefighter's body dressed in heat protective clothing, modelling, experimental research

Type of article: original scientific article

ABSTRAKT

Wprowadzenie: Gaszenie pożarów wiąże się z dużym ryzykiem dla życia i zdrowia strażaków. Temperatura i obciążenie fizyczne, które oddziałują na strażaków osiągają często wartości krytyczne dla organizmu człowieka oraz materiałów, z których wykonane jest ubranie chroniące przed wpływem ciepła. Przekroczenie tych wartości doprowadza do przegrzania ciała lub poparzeń. Aby zwiększyć bezpieczeństwo pracy strażaków, należy znać granice czasowe, w jakich strażak może pracować w określonych warunkach podczas gaszenia pożaru i nie dopuszczać do ich przekroczenia. Maksymalny czas zależy od czynników takich jak: charakterystyka ubrania chroniącego przez oddziaływanie ciepła (liczba, materiał i grubość warstw), temperatura, wilgotność i prędkość owiewu ubrania przez otaczające powietrze oraz poziom obciążenia.

Cel: Celem artykułu jest opracowanie i weryfikacja modelu obliczeniowego stanu cieplnego ciała strażaka w ubraniu chroniącym przez oddziaływanie ciepła w różnych warunkach termicznych. Model posłuży dla prognozowania i analizy stanu cieplnego oraz określenia maksymalnego/granicznego czasu pracy strażaka.

Metody: Jednoczesne modelowanie stanu cieplnego ciała strażaka oraz ubrania chroniącego przed oddziaływaniem ciepła pozwoli na przeanalizowanie wielu warunków pracy strażaka, oraz czynników wpływających na stan cieplny jego organizmu. Tego rodzaju modelowanie pozwala określać maksymalną długość pracy strażaka w danych warunkach oraz opracować konfigurację nowego ubrania chroniącego przed oddziaływaniem ciepła. Jednocześnie można będzie analizować poziom komfortowych i granicznych temperatur ciała człowieka, które wynoszą średnio 37,2–38°C. Modelowanie pozwoli również ograniczyć liczbę drogich badań w warunkach rzeczywistych nad materiałami odzieży ochronnej, przeprowadzanych dla różnych warunków środowiskowych i charakteru pracy strażaka podczas gaszenia pożaru.

Wyniki: Przedstawione wyniki badań eksperymentalnych stanu cieplnego w przestrzeni pod ubraniem ochotników uczestniczących w badaniach, wykonujących ćwiczenia fizyczne o zróżnicowanym natężeniu, zostały wykorzystane do zweryfikowania prezentowanego modelu. Wyniki uzyskane podczas eksperymentalnych pomiarów temperatury ciała ochotników ubranych w odzież ochronną i wykonujących prace w temperaturze pokojowej o różnym stopniu natężenia były bardzo zbliżone do wyników obliczeń modelowych. Różnice nie wynosiły więcej niż 2°C.

Wnioski: Efektem prac jest opracowany dwumiarowy model wymiany ciepła w ubraniu ochronnym, uwzględniający procesy termiczne i mechanizmy termoregulacji przy różnych poziomach obciążenia fizycznego, w tym wewnętrzne wydzielanie ciepła, zmienną przepuszczalność tkanin, odprowadzanie ciepła przez wydzielanie potu i oddychanie.

Słowa kluczowe: ochrona pracy, stan cieplny ciała strażaka w ubraniu chroniącym przed ciepłem, modelowanie, badanie eksperymentalne

Typ artykułu: oryginalny artykuł naukowy

1. Введение

„Работа пожарного при тушении пожаров сопряжена с большим риском для жизни и здоровья. Тепловое воздействие и физические нагрузки при этом часто граничат с предельными уровнями для человека и материалов теплозащитной одежды пожарного (ТЗОП) или превышают их что приводит к перегреву или ожогам пожарного. При внутреннем перегреве организма увеличивается частота сердечных сокращений и давление, что приводит к нарушению терморегуляции, ухудшению самочувствия и может привести к тепловому удару. Для увеличения безопасности работы крайне важно знать предельное время работы пожарного (ПВРП) в тех или иных условиях тушения пожаров и не допустить его превышения” [1]. Это предельное время зависит от таких факторов, как характеристики ТЗОП (количество, материал и толщина слоев), температура, влажность и скорость обдува костюма окружающим воздухом, а также тяжести вы-

полняемой нагрузки.

Так, материал теплозащитной одежды пожарного может перегреться либо прожигаться, что может вызвать возникновение ожогов. Авторская работа [1] посвящена исследованию и моделированию теплового состояния фрагмента теплозащитной одежды пожарного при воздействии интенсивных тепловых нагрузок, однако она не учитывала состояния организма человека и его возможного перегрева. Для определения ПВРП также необходимо учитывать возможное повышение внутренней температуры организма пожарного вследствие выполнения тяжелой физической работы, что особо важно при повышенных температурах пожара.

Совместное моделирование теплового состояния человека и теплозащитной одежды, в которой он работает, даст возможность анализировать большое количество условий работы пожарного, а также факторов влияющих на его тепловое состояние. Такое моделирование позво-

ляет определять максимальную продолжительности работы пожарного в тех или иных условиях, а также проводить оптимальное проектирование конфигурации новой теплозащитной одежды. При этом будет возможно анализировать уровень комфортных и предельных температур тела человека, который в среднем лежит в диапазоне 37,2-38°C. Такое моделирование позволит также уменьшить количество дорогостоящих натуральных испытаний материалов защитной одежды в различных диапазонах параметров среды и характере работ пожарного при тушении пожаров. Таким образом разработка моделей анализа теплового состояния человека в теплозащитной одежде является актуальной задачей, продолжением авторской работы [1] с учетом существующих работ и описанных ниже известных механизмов, определяющих тепловое состояние пожарного.

Целью данной работы является разработка и верификация расчетной тепловой модели пожарного в теплозащитной одежде при различных условиях тепловых воздействий для прогнозирования и анализа теплового состояния и определения предельного времени работы пожарного.

Для достижения цели были выполнены и ниже изложены результаты следующих задач:

1. проведен анализ существующих работ по моделированию теплового состояния пожарного в ТЗОП при различных условиях тепловых воздействий;
2. приведены результаты тепловых испытаний пожарного в ТЗОП при выполнении работ различной сложности при температуре воздуха (17°C), близкой к комнатной;
3. разработана расчетная модель теплового состояния пожарного в ТЗОП при произвольных условиях испытаний;
4. проведена идентификация недостаточно известных параметров и верификация модели по результатам проведенных испытаний.

Идея работы состоит в том, что разработанная тепловая модель пожарного в защитном костюме настраивается и проверяется по эксперименту, проведенному при комнатных температурах, может затем использоваться для определения теплового состояния пожарного и определения предельного времени работы при повышенных температурах воздействия различных сценариев пожара.

Для обеспечения достоверности моделирования применяется так называемый расчетно-экспериментальный подход, при котором недостаточно известные параметры

модели определяются путем их идентификации по экспериментальным данным, что будет показано ниже.

2. Анализ публикаций

Медицинская литература и литература по охране труда содержит достаточно сведений о механизмах теплообмена и терморегуляции человеческого организма с окружающей средой. Основные составляющие такого теплообмена следующие.

2.1. Внутреннее тепловыделение

Человеческий организм в процессе жизнедеятельности постоянно производит некоторое количество теплоты, зависящее от физической активности. Так, при отдыхе тепловыделение составляет 120-180 Вт, при тяжелой физической работе или занятиях спортом эта величина возрастает до 700-1000 и выше Вт. Значения тепловыделения Q_m при различных видах физической активности, используемые в данной работе, взяты из [2-3] и приведены в табл.1.

Теплоотдача с поверхности тела человека осуществляется путем теплового излучения, конвекции (движения и перемещения нагреваемого теплом воздуха), теплопроводности (отдачи тепла веществам, непосредственно соприкасающимся с поверхностью тела) и испарения воды с поверхности кожи и выноса теплого воздуха и влаги легкими.

Температура тела живых организмов поддерживается в определенных границах, даже при сильных изменениях температуры окружающей среды за счет терморегуляции, осуществляемой путем изменений отдачи тепла организмом. Основными механизмами терморегуляции являются изменение величины тепловыделения, перераспределение интенсивности кровообращения наружных и внутренних тканей, потоотделение, изменение частоты и глубины дыхания. Особое значение терморегуляция приобретает при поддержании постоянства температуры тела во время пребывания организма в условиях повышенной температуры окружающей среды.

2.2. Переменная тепловая проводимость тканей организма

Температура кожи, а следовательно, интенсивность теплообмена под кожей и от кожи в окружающую среду могут изменяться в результате перераспределения кро-

Таблица 1. Полное Q_m и поверхностное Т.выд метаболическое тепловыделение человека в зависимости от вида физической активности [2-3]

Table 1. Total Q_m and surface metabolic human heat release HR depending from the type of physical activity [2-3]

Вид физической активности / Type of physical activity	Т.выд. на ед. поверхности, Вт/м ² / HR for a surface unit W/m ²	Полное т.выд, Q_m , Вт / Total HR, Q_m , W
Сон / Sleep	50	98,5
Отдых, бодрствование / rest, wake	60	118,2
Стояние / Standing	90	177,3
Работа за столом, вождение / office work, driving	95	187,15
Легкая работа стоя / easy standing work	120	236,4
Ходьба 4 км/ч / walking 4 km per hour	180	354,6
Ходьба 5,5 км/ч / walking 5,5 km per hour	250	492,5
Тяж. (Ходьба 5,5 км/ч с грузом 20 кг) / hard walking 5,5 km per hour with weight of 20 kg	350	689,5
Очень тяжелая работа или спорт / very hard work or sport	600	1182

ви в сосудах и при изменении объема циркулирующей крови. При повышении температуры окружающей среды или при повышенном выделении метаболической теплоты сосуды расширяются, количество циркулирующей в их крови увеличивается. Возрастает также объем циркулирующей крови во всем организме вследствие перехода воды из тканей в сосуды, а также потому, что селезенка и другие кровяные депо выбрасывают в общий кровоток дополнительное количество крови. Увеличение количества крови, циркулирующей через сосуды у поверхности тела, способствует теплообмену в окружающую среду с помощью радиации и конвекции. На холоде, наоборот, происходит уменьшение количества крови, циркулирующей через поверхностные сосуды, и увеличение количества крови, проходящей через сосуды внутренних органов, что способствует сохранению тепла во внутренних органах.

2.3. Потоотделение

Для сохранения постоянства температуры тела человека при высокой температуре окружающей среды основное значение имеет испарение пота с поверхности кожи. Так при интенсивных тренировках спортсменов существенная часть теплоты отводится путем испарения пота с поверхности кожи, что приводит к потере жидкости до 3-4,5 литров в час. Роль потоотделения также повышается при повышении температуры окружающей среды до уровня температуры тела, что делает невозможным отвод теплоты излучением и конвекцией. При этом температура тела поддерживается на постоянном уровне исключительно с помощью испарения воды с поверхности кожи и альвеол легких.

Испарение воды зависит также от относительной влажности воздуха. В насыщенном водяными парами воздухе вода испаряться не может, поэтому при высокой влажности атмосферного воздуха высокая температура переносится тяжелее, чем при низкой влажности. В насыщенном водяными парами воздухе (например, в бане) пот выделяется в большом количестве, но не испаряется и стекает с кожи. Такое потоотделение не способствует отдаче избыточного тепла от организма.

Плохо переносится также непроницаемая для воздуха одежда (резиновая и т.п.), препятствующая испарению пота, т.к. слой воздуха между одеждой и телом также быстро насыщается парами и дальнейшее испарение пота прекращается.

2.4. Дыхание

Так как некоторая часть воды испаряется легкими в виде паров, насыщающих выдыхаемый воздух, дыхание также участвует в поддержании температуры тела на постоянном уровне. При высокой окружающей температуре дыхательный центр рефлекторно возбуждается становится более глубоким, а при низкой угнетается и дыхание становится менее глубоким [4].

В литературе есть описание ряда расчетных моделей теплового состояния человека в специальных костюмах. Уровень сложности этих моделей колеблется от самых простых, учитывающих среднее тепловое состояние всей поверхности человека и однослойную структуру костюма, до очень сложных, учитывающих теплообмен и кровяной обмен отдельных частей человека и детальную многослойную структуру костюма. Имеются сведения о моделировании тепловых процессов человеческого организма для различных целей. Эти модели различны по сложности, но в целом имеют один и тот же подход к рассматриваемой проблеме, смысл которого состоит в моде-

лировании всего или отдельного участка тела человека, отражающего основные свойства (объем, плотность, теплоемкость) реально существующей части тела человека. При этом, в таких моделях такие участки связаны тепловыми связями, которые моделируют реальные условия теплообмена теплопроводностью, конвекцией и газообменом (массообменом) между отдельными частями тела, а также между телом и окружающей средой. Сложность таких моделей определяется количеством расчетных узлов и тепловых связей между ними, при помощи которых моделируются тепловые процессы во всем организме. При этом степень детализации модели зависит от конкретной задачи и точности, с которой должно быть получено ее решение. Так, в статье [5] человеческий организм моделируется при помощи 51-го узла, в [6] при помощи 15 узлов, в [7] – всего 2-х узлов.

Таким образом разработка и верификации физической, математической и компьютерной моделей теплового состояния пожарного в теплозащитном костюме, выполняющего физическую работу различной тяжести, является актуальной. Такая модель должна учитывать все основные тепловые процессы и механизмы терморегуляции, влияющие в конечном итоге на тепловое состояние и тепловой комфорт пожарного при выполнении работ по тушению пожаров. Рассмотрим такую модель ниже.

3. Методика исследования

3.1. Описание физической и математической модели

В работе представлена конечно-элементная компьютерная модель нестационарного теплового состояния человека с упрощенным представлением геометрии тела, но учетом всех основных процессов, происходящих в нем. В модели не рассматриваются такие сложные биологические процессы как течение крови по сосудам, тепловыделение в результате химических реакций, внутренние процессы в органах и клетках человеческого тела и т.д., а рассматриваются только обобщающие характеристики этих процессов, что позволяет математически описывать основные тепловые процессы человеческого организма. Так, все внутренние органы и мышцы, в которых происходит выделение основной части метаболической теплоты, в модели упрощенно представлены объемом „теплового ядра” [3] с эффективными значениями теплофизических свойств и тепловыделения. Ткани, лежащие вблизи поверхности тела, представлены в модели поверхностным слоем со своими теплофизическими свойствами, часть которого (тело) покрыта костюмом, состоящим из трех слоев, а часть (лицо головы) не покрыта и охлаждается непосредственно в окружающую среду.

Количество метаболической теплоты Q_m зависит от вида физической активности и представлено в табл. 1. Часть этой теплоты идет на изменение температуры частей тела, а часть $Q_{дых}$ на подогрев вдыхаемого воздуха. Оставшаяся часть передается поверхности организма и через нее в окружающую среду. Условная схема теплообмена для данного случая представлена на рис. 1.

Для моделирования данной тепловой схемы была построена 2х-мерная геометрическая и сеточная компьютерная модель, представленная на рис. 2. На рисунке тело имеет толщину X_1-X_0 и высоту Y_1-Y_0 а голова высоту Y_2-Y_2 при той-же толщине X_1-X_0 . Трехслойный костюм с воздушными прослойками между отдельными слоями расположен между координатами X_2 и X_6 .

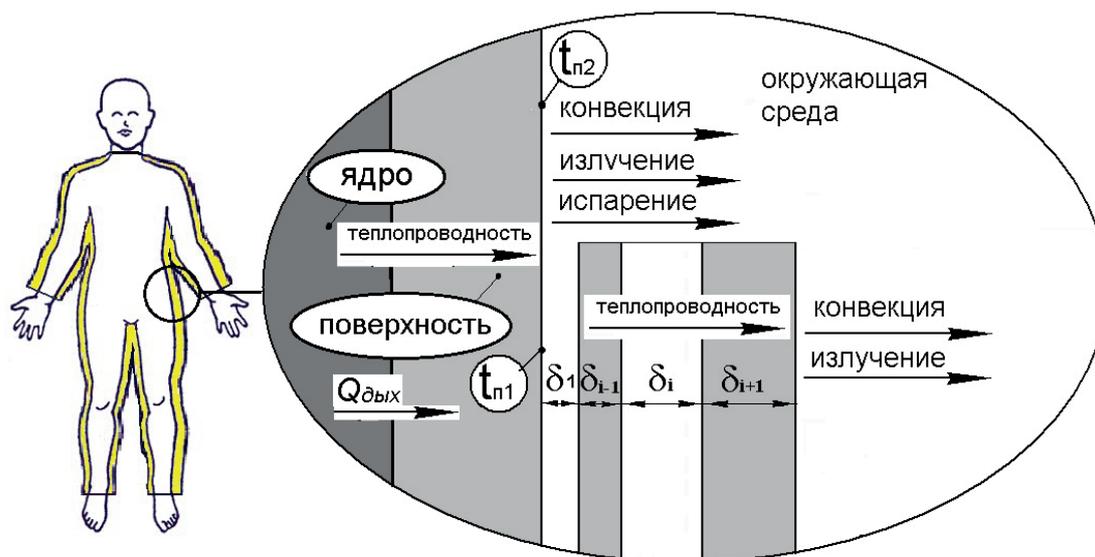


Рис. 1. Схема теплообменных процессов человека в теплозащитном костюме с окружающей средой, t_{n1} – температура поверхности тела, покрытой костюмом, t_{n2} – не покрытой костюмом, x_i - x_j – координаты границ слоев теплозащитного костюма
 Источник: Собственная разработка.

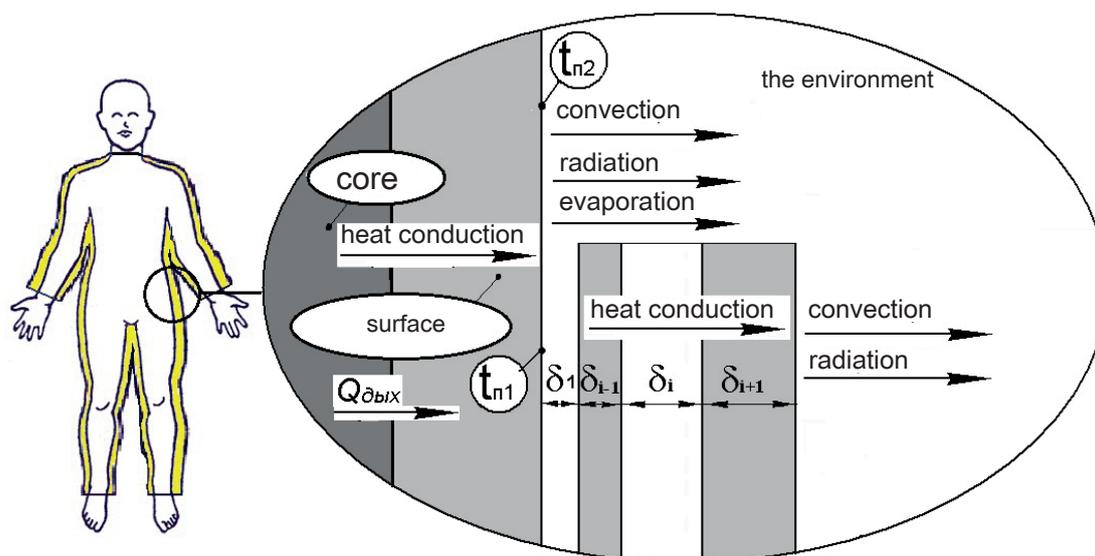


Fig. 1. The scheme of the human heat exchange processes in heat-protective suit within the environment, t_{p1} – temperature of body surface, covered by suit; t_{p2} – not covered by suit, x_i - x_j – coordinates of the suit layers lines
 Source: Own elaboration.

3.2. Исходные данные для моделирования

Для данной модели были приняты следующие средние физические параметры человека: рост $h=175$ см, вес $m=75$ кг. Площадь поверхности тела S вычислялась по зависимости, взятой из [3]

$$S = 0,2 \cdot m^{0,425} h^{0,725} = 0,2 \cdot 75^{0,425} \cdot 1,75^{0,725} = 1,97, m^2 \quad (1)$$

Принято, что примерно 10% площади тела не покрыто защитной одеждой (ладони рук, шея, голова), теплота

от которой будет непосредственно уходить в окружающую среду.

Объемы модели в системе координат имеют следующую протяженность. Объем теплового ядра: по оси x от x_0 до x_1 , по оси y – от y_0 до y_2 . Поверхностный слой тела закрытый ТЗОП: по оси x от x_1 до x_2 , по оси y – от y_0 до y_1 . Поверхностный слой тела, обращенной в окружающую среду: по оси x от x_1 до x_2 , по оси y – от y_0 до y_1 .

Теплофизические свойства основных частей тела, принятые в модели, представлены в табл. 2.

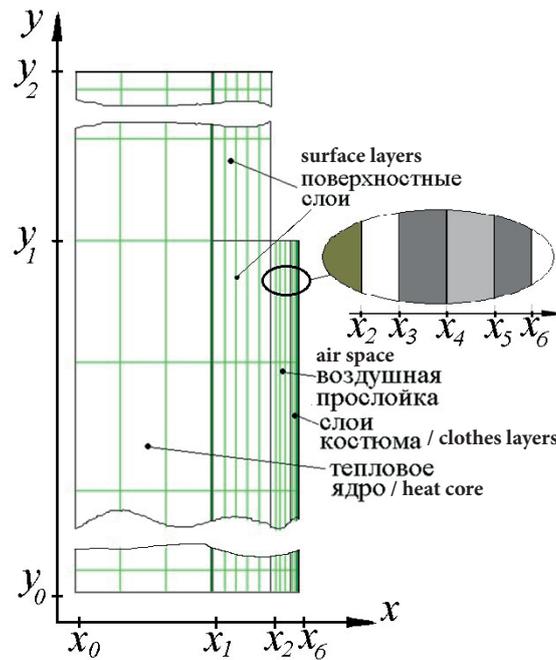


Рис. 2. Геометрическая и сеточная компьютерные модели человека в защитном костюме

Fig. 2. Geometrical and grid computer models of a man in the heat-protective suit

Источник: Собственная разработка.

Source: Own elaboration.

Таблица 2. Объемы и теплофизические свойства основных частей тела

Table 2. The volume and thermophysical characteristics of the main parts of the body

Название объема модели / Model volume name	V, м ³ / V, m ³	ρ, кг/м ³ / ρ, kg/m ³	c, кДж/(кг*с) / c, kJ / (kg*s)	λ, Вт/(м*с) / λ, W / (m*s)
Тепловое ядро / thermal nucleus	0,056	1000	2240	20
Поверхностный слой тела закрытый ТЗОП / body surface layer, covered by firefighters' heat-protecting clothes	0,0216	1000	2240	f(тя)
Поверхностный слой тела, обращенной в окружающую среду / body surface layer, opened to the environment	0,0024	1000	2240	f(тя)

Коэффициент теплопроводности теплового ядра λ_n был принят равным 20 для обеспечения быстрого и равномерного распределения температуры по этому объему. Детальное объяснение коэффициента теплопроводности объемов поверхностных слоев $\lambda_n(t_n)$ представлено ниже.

В модели приняты параметры реального ТЗОП USP 2-2, который был одет на волонтера в ходе эксперимента. Расположение слоев ТЗОП по оси x и y представлено на рис. 2, а толщины и теплофизические свойства слоев теплозащитного костюма представлены на рис. 2 и в таблице 3 [8-9].

Таблица 3. Геометрические и физические свойства слоев теплозащитной одежды [8-9]

Table 3. Geometrical and physical preferences of heat-protective clothes layers [8-9]

Координаты слоя / layer coordinates	Название и назначение слоя теплозащитного костюма / Name and purpose of the heat-protective suit layer	Толщина, м / Thickness, m	Плотность, кг/м ³ / density kg/m ³	Теплоемкость, Дж/(кг*с) / heat capacity, J / (kg*s)	Теплопроводность при 20°C, Вт/(м*с) / thermal conductivity with 20°C, W/(m*s)
x ₂ -x ₃	Воздушная прослойка / air streak	0,005	1,2	1005	4,6
x ₃ -x ₄	Теплозащитный слой ARALITE / heat-protective layer ARALITE	0,00359	74,2	700	0,036
x ₄ -x ₅	Влагостойкий материал, неопрен / damp-proof material, neoprene	0,00051	800	2000	0,012
x ₅ -x ₆	Верх (Nomex® IIIA Pajama Check® Crosstech®) / Top (Nomex® IIIA Pajama Check® Crosstech®)	0,00052	316,8	1300	0,047

Теплообмен в тепловом ядре, поверхностном слое тела и слоях защитного костюма описывается двухмерным нестационарным уравнением теплопроводности, которое может быть записано

$$c(x, y)\rho(x, y)\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda(x, y, t)\frac{\partial t}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda(x, y, t)\frac{\partial t}{\partial y}\right) + Q_v(x, y) \quad (2)$$

где c , ρ и λ – теплоемкость, плотность и коэффициент теплопроводности объемов тела и слоев костюма, представленные в табл. 2 и 3, в зависимости от координаты x и y и принимающие значение соответствующего объема, а и в ряде случаев зависящие от температуры t . Q_v – внутренний источник теплоты, который для теплового ядра равен сумме метаболического тепловыделения Q_m и отвода теплоты дыханием $Q_{\text{дых}}$.

3.3. Граничные условия

На левой границе задано отсутствие теплообмена:

$$\lambda \frac{\partial t(x_0, \tau)}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

Отсутствие теплообмена также задано на „торцах” модели ($y=y_0$ и $y=y_2$, $x_0 < x < x_2$)

$$\lambda(x, y, t)\frac{\partial t}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

На наружной поверхности ТЗОП ($x=x_0$, $y_0 < y < y_1$) действуют совмещенные конвективно-радиационные граничные условия теплообмена

$$\lambda(x_0, t)\frac{\partial t(x_0, \tau)}{\partial x} = q_{\text{конв}} + q_{\text{рад}} \quad (5)$$

где $q_{\text{конв}} = \alpha(t_n - t_{\text{oc}})$ и

$$q_{\text{рад}} = 5.67 \cdot \varphi \cdot \xi \cdot \left(\left(\frac{t(x_0, \tau) + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{\text{oc}} + 273}{100} \right)^4 \right) \quad (6)$$

При этом коэффициент теплоотдачи принят равным $5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$, степень черноты принята равной $0,7$.

Граничные условия на наружной не защищенной поверхности поверхностного слоя ($x=x_2$, $y_1 < y < y_2$), обращенного в окружающую среду, имеют вид

$$\lambda_n(t_n)\frac{\partial t(x_2, \tau)}{\partial x} = q_{\text{конв}} + q_{\text{рад}} + q_{\text{но}} \quad (7)$$

где $q_{\text{но}}$ тепловой поток, учитывающий отвод теплоты при испарении пота на наружной поверхности тела, описанный ниже.

Механизмы терморегуляции реального организма в модели реализованы за счет сброса теплоты, отводящейся дыханием из теплового ядра, сбросом теплоты с поверхности, что моделирует отдачу теплоты потоотделением, а также переменным эффективным коэффициентом теплопроводности ядра и поверхностного слоя тела, что имитирует зависимость интенсивности внутреннего теплообмена от интенсивности кровообращения.

4. Результаты и их обсуждение

4.1. Переменная теплопроводность слоев поверхности

В модели интенсивность теплообмена теплового ядра с поверхностью тела определяется эффективным коэффициентом теплопроводности материала объемов поверхности тела, зависящим от температуры теплового ядра. Этот коэффициент должен увеличиваться при увеличении температуры тела для усиления отвода теплоты и предотвращения перегрева. Таким образом, учитывается ускорение кровообращения при нагрузке, что приводит к более интенсивному переносу теплоты от внутренних органов и мышц реального организма к его поверхности. В модели этот коэффициент теплопроводности является функцией температуры теплового ядра в виде линейного закона

$$\lambda = k \cdot T_j + b \quad (8)$$

где k и b – коэффициенты, значения которых определялись путем идентификации из условий того, что при определенных степенях тяжести физических нагрузок и соответствующих им уровней производимой теплоты, температура „теплового ядра” и поверхности принимает определенные значения, которые можно взять из литературы [2] или измерить в эксперименте.

На основании приведенных данных значения коэффициентов в (8) путем идентификации были определены как $k=1,9$ и $b=-590,16$.

4.2. Теплообмен потоотделением

Теплообмен потоотделением был оценен исходя из следующих данных. Известно, что при интенсивной физической нагрузке с потом теряется 2-4,5 литров жидкости в час [4]. В данной работе было принято значение $3 \text{ л}/\text{час}$. Зная площадь поверхности тела S , теплоту парообразования воды, можем вычислить расход жидкости с единицы поверхности

$$G_{\text{но}} = 3 \text{ л}/(1,97 \text{ м}^2 \cdot 3600 \text{ с}) = 4,23 \cdot 10^{-4} [\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})] \quad (9)$$

и максимальный уровень теплоотдачи при испарении пота $q_{\text{нmax}}$ с единицы поверхности по зависимости

$$q_{\text{нmax}} = k \cdot r \cdot G_{\text{но}} = 1 \cdot 2260 \cdot 10^3 \cdot 4,23 \cdot 10^{-4} = 956, \text{ Вт}/\text{м}^2 \quad (10)$$

где k – коэффициент, изменяющийся от 0 до 1, который может учитывать неполное испарение выделяющегося пота, например из-за повышенной влажности окружающей среды или ограниченности отвода влажного воздуха от поверхности в защитной одежде.

В модели интенсивность потоотделения зависит от температуры ядра по зависимости

$$\begin{aligned} q_{\text{но}} &= 0 \quad \text{при} \quad t_j \leq 37,5 \text{ C} \\ q_{\text{но}} &= (0,9 - 33,65 t_j) \cdot q_{\text{нmax}} \quad \text{при} \quad 37,5 \text{ C} < t_j < 38,5 \text{ C} \\ q_{\text{но}} &= q_{\text{нmax}} \quad \text{при} \quad t_j \geq 38,5 \text{ C} \end{aligned} \quad (11)$$

Так при нормальной температуре ядра $37,5^\circ \text{C}$ и ниже теплоотдача потоотделением отсутствует, в пределах от

37,5 до 38,5 °C она возрастает по линейной зависимости, а выше 38,5 °C равна максимуму.

4.3. Теплообмен дыханием

Теплота, отводящаяся с дыханием $Q_{\text{дых}}$, задается в компьютерной модели как внутренний сток теплоты, действующий в объеме теплового ядра. Она вычисляется как сумма теплоты, идущей на подогрев вдыхаемого воздуха до температуры тела и на испарение влаги в легких. Принято допущение, что выдыхаемый воздух полностью насыщен водяными парами по следующей зависимости

$$Q_{\text{дых}} = G_{\text{дых}} \cdot ((m_{\text{нас}}^{t_{\text{я}}} - m_{\text{нас}}^{\text{oc}} (100\% - W)) \cdot r_{\text{n}} + c_{\text{p}} \rho (t_{\text{я}} - t_{\text{oc}})) \quad (12)$$

где $G_{\text{дых}}$ – объемный расход воздуха, проходящего через легкие, м³/с; $m_{\text{нас}}$ – влагосодержание насыщенного влажного воздуха при температуре ядра и температуре окружающей среды, кг/м³; r_{n} – теплота парообразования воды, Дж/кг; W – относительная влажность вдыхаемого воздуха; c_{p} – удельная теплоемкость воздуха Дж/(кг·К) и ρ – плотность вдыхаемого воздуха, кг/м³.

При увеличении физической нагрузки глубина и частота дыхания увеличивается, а величина $G_{\text{дых}}$ зависит от интенсивности выполняемой нагрузки. Эта величина рассчитывается как произведение частоты вдохов-выдохов на объем вдыхаемого за один вдох воздуха. Так, в состоянии покоя объемный расход воздуха составляет около 0,0001 м³/сек, в то время как при выполнении работы эта величина увеличивается в 7 – 10 раз [2]. В модели эта зависимость выражена в виде линейной функции

$$G_{\text{дых}} = 2,609 \cdot 10^{-6} \cdot Q_{\text{я}} - 2,13 \cdot 10^{-4} \quad (13)$$

Начальным условием для поставленной нестационарной задачи принималось распределение температур, полученное при решении стационарной задачи при мощности метаболического тепловыделения $Q_{\text{м}} = 177,3$ Вт.

4.4. Описание экспериментальных испытаний

Для верификации разрабатываемой модели и определения ее параметров были использованы результаты испытаний волонтера в костюме в Психолого-Тренировочном центре, который расположен в помещении учебной пожарно-спасательной части на территории ЛГУ БЖД. Целью проведения исследования было определение температурных режимов подкостюмного пространства в условиях выполнения физической нагрузки разного уровня сложности (легкой, средней, тяжелой).

Тренажерный зал центра предназначен для предоставления с помощью тренажеров дозированной физической нагрузки разного уровня сложности. В нем установлены 4 тренажера: велоэргометр, степпер и беговая дорожка (рис. 3).

В испытаниях исследовалось тепловое состояние 5-ти курсантов в возрасте от 17 до 19 лет. Температура в помещении тренажерного зала составляла 16 °C. Измерения температуры подкостюмного пространства производились при помощи термопар, расположенных на грудной клетке (область сердца), на спине, в области колена и в области размещения печени.

В результате испытаний были получены значения измеренных температур во времени, которые затем были сравнены с результатами, полученными расчетным путем с помощью описанной выше компьютерной модели.

Исходные данные модели были заданы такими, чтобы соответствовать условиям эксперимента, а именно: температура окружающей среды 17 °C, тепловыделения 600 и 800 Вт, соответствующие уровням более легкой и более тяжелой нагрузок. Остальные параметры описаны при рассмотрении модели выше.

Результаты сравнения экспериментальной и расчетной кривых температур подкостюмного пространства для уровня легкой и тяжелой нагрузок представлены на рис. 4.

Как видно из рисунка, температурные кривые, полученные в результате моделирования, близки к экспериментальными кривыми. Для случая легкой нагрузки максимальное отличие экспериментальных температур

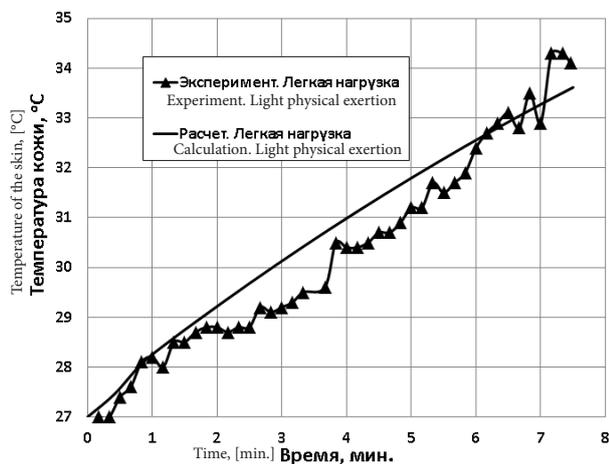


Рис. 3. Волонтер в процессе испытания костюма на беговой дорожке

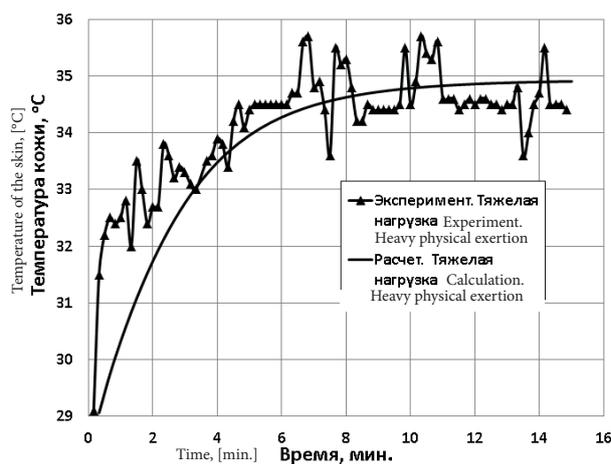
Fig. 3. The volunteer testing the suit on a treadmill

Источник: Собственная разработка.

Source: Own elaboration.



(a)



(b)

Рис. 4. Зависимости температуры подкостюмного пространства в области груди человека, полученные расчетным и экспериментальными путями для легкой (а) и тяжелой (б) нагрузках

Fig. 4. The dependence of under suit space temperature around the human chest, taken in the way of calculations and experiments for light (a) and heavy (b) physical exertion

Источник: Собственная разработка.

Source: Own elaboration.

от расчетных составляет не более 1°C. Для тяжелой нагрузки максимальное отличие расчетных результатов от эксперимента составляет около 2°C в первые 2 мин. Испытания, однако в остальное время расчетная кривая качественно и количественно отражает характер экспериментальной кривой, в частности виден выход температуры поверхности на стационарное значение 34,5°C к 6-8-й минутам. Следует отметить, что температура кожи и подкостюмного пространства могут меняться в зависимости от сложно предсказываемых факторов, таких, как плотность прилегания теплозащитной одежды к телу в каждый момент времени, индивидуальные особенности организма и т.д., что может увеличивать расхождение экспериментальных и расчетных результатов. Также следует отметить, что результат, как эксперимента, так и расчета сильно зависят от начального состояния человека и от выполняемой им деятельности перед замерами, что следует учитывать при использовании такой модели для определения предельного времени работы пожарного.

Как указывалось выше, идеей данной работы является использование модели, настроенной по полученным при комнатной температуре экспериментальным данным, для определения теплового состояния пожарного и определения предельного времени работы при повышенных температурах пожара. Такие расчеты теплового состояния пожарного при повышенных температурах со стороны пожара необходимо проводить при выбранных сценариях пожара, которые не входят в объем данной работы и являются предметом дальнейших работ.

5. Выводы

1. Проведен обзор существующей литературы по исследованиям тепловых процессов человеческого организма, процессов терморегуляции и моделированию теплового состояния человека в защитных костюмах.
2. Разработана двухмерная модель теплообмена тела пожарного в защитном костюме учитывающая основные тепловые процессы и механизмы терморегуляции при различных уровнях физических нагрузок,

а именно: внутреннее тепловыделение, переменную проводимость тканей, теплоотвод потоотделением и дыханием.

3. Представлены результаты экспериментальных исследований теплового режима подкостюмного пространства волонтеров, выполняющих физические упражнения разной тяжести, которые были использованы для верификации представленной модели.
4. Сравнение результатов экспериментальных измерений температуры тела волонтеров, одетых в теплозащитную одежду и выполняющих работу при комнатной температуре и разных степенях тяжести, с результатами модельных расчетов, показали их близость (расхождение не более 2°C).
4. Предложенная модель может быть использована для определения максимального времени пребывания пожарного в защитном костюме при воздействии высоких температур и оптимальном проектировании параметров костюмов.

Литература

- [1] Bolibrukh B.V., Chmiel M., *Razrabotka i verifikatsiya raschetnoy modeli teplovogo sostoyaniya teplozaschitnoy odezhdyi pozhnogo pri razlichnyih vidah ispytaniy*, BiTP Vol. 38 Issue 2, 2015, pp. 53-61.
- [2] Litvinova G.O., *Gigiya s osnovamii ekologii*, Zdorovya, Kiev 1999.
- [3] Campbell G. S., Norman J. M., *An Introduction to environmental biophysics*, Spinger, USA Madison 1998.
- [4] Pokrovskiy V.M., Korotko G.F., *Fiziologiya cheloveka*, Medicina, Moskva 2003.
- [5] Kurmazenko E.A., Matjushev T.V., Soloshenko N.V., *A detailed simulation model of the human organism thermoregulation system*, Sixth European Symposium on Space Environmental Control Systems, Noordwijk, Netherlands, 20-22 May, 1997, SP-400, 1997, 815-821.
- [6] Fiala D., Lomas K. J., Stohrer M., *A computer model of human thermoregulation for a wide range of environmental conditions: the passive system*, „J. Appl. Physiol.” Issue 87, 1999, 1957-1972.
- [7] Prek M., *Thermodynamical analysis of human thermal comfort*, “Energy” Vol. 31, 2006, 732-743.

- [8] Barker R.L., Song G., Hamouda H., Thompson D.B., Kuznetsov A., Deaton A.S., NTC Project: S01-NS02 (formerly I01-S02), National Textile Center Annual Report: November 2002, 1Modeling Thermal Protection Outfits for Fire Exposures.
- [9] Vettori R., *Estimates of Thermal Conductivity for Unconditioned and Conditioned Materials Used in Fire Fighters' Protective Clothing*, National Institute of Standards and Technology Gaithersburg, MD 20899-8661, 2005.

Обозначения:

G - расход, объемный, м³/с, или массовый, кг/с
 S - площадь, м²
 T, t - температура, °C
 Q - тепловыделение, передаваемая теплота, Вт
 V - объем, м³
 W - относительная влажность, %
 c - удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)
 h - высота, м
 m - масса, кг
 r - теплота парообразования, Дж/кг
 λ - коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)
 ρ - плотность, кг/м³
 t - время, с

Сокращения:

ТЗОП - теплозащитная одежда пожарного
 Т.выд. - тепловыделение с поверхности
 ПВРП - предельное время работы пожарного

Индексы нижние:

ос. - относится к окружающей среде
n - относится к объему поверхностного слоя
По - относится к потоотделению
m - относится к метаболическому тепловыделению
я - относится к тепловому ядру

Индексы верхние:

i, i-1 - относится к текущему или предыдущему шагу по времени

* * *

Болибрух Борис Васильевич – кандидат технических наук, доцент Львовского Государственного университета безопасности жизнедеятельности, г.Львов, Украина. Автор более пятидесяти научных работ, разработчик трех национальных стандартов в области пожарной безопасности. Автор пяти учебных пособий, три из которых рекомендованы Министерством образования и науки Украины, автор семи патентов на изобретения, руководитель диссертационных исследований.

ст. бриг. др инж. Марек Хмель – Комендант Центральной школы Государственной пожарной службы в городе Ченстохова, кандидат технических наук в сфере электротехники. Автор и соавтор многих публикаций как государственного, так и международного уровня. Благодаря своей научно-исследовательской деятельности получил множество наград и премий, в том числе: Диплом Министра науки и высшего образования во время XIX Выставки изобретений (Варшава, март 2012), медаль Комиссии национального образования за особые достижения в образовании и воспитании в июне 2013, премию на X Международной выставке Eduga - Образование и техника службы спасения, в категории Исследовательские проекты 2014.

магистр инж. Юлия Мазур – выпускница Университета Лазарского в Варшаве на кафедре Публичной Администрации. С 2008 года сотрудник Научно-Исследовательского Центра Противопожарной Охраны – Государственного Исследовательского Института. В настоящее время руководитель Центра по работе с клиентами, главный специалист. С 2012 года редактор русского языка ежеквартальника CNBOP-PIB „Безопасность и Пожарная Техника”. Соавтор статей в стране и за рубежом. Дополнительно исполняет обязанности Председателя Местного совета профсоюзов пожарных, действующего при CNBOP-PIB.