

Методы измерения теплового сопротивления спецодежды арктического пользования

С.Р. Яшин

Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Статья посвящена систематизации методов измерения теплового сопротивления спецодежды, предназначенной для использования в экстремальных условиях Арктики. Рассмотрены традиционные подходы, такие как калориметрия и испытания на термоманекенах, а также современные технологии, включая инфракрасную термографию, компьютерное моделирование и «умные» текстильные датчики. Выявлены ключевые проблемы, связанные с несоответствием лабораторных данных реальным условиям эксплуатации: влияние ветровой нагрузки, высокой влажности и температур ниже -50°C . Проанализированы ограничения действующих стандартов (ГОСТ 12.4.303-2016, ISO 15831:2004) и предложены пути их модернизации, в том числе введение поправочных коэффициентов для учета гибридных климатических факторов. Особое внимание уделено перспективным направлениям, таким как интеграция искусственного интеллекта для анализа данных, разработка наноструктурированных утеплителей и гармонизация российских нормативов с международными требованиями. Статья подчеркивает необходимость междисциплинарного подхода, объединяющего материаловедение, климатологию и цифровые технологии, для повышения безопасности и эффективности спецодежды в условиях растущей антропогенной нагрузки на арктические регионы.

Ключевые слова: тепловое сопротивление; спецодежда арктического назначения; методы измерения; стандартизация; климатические факторы; гибридные методы.

Рукопись получена: 14.04.2025

Рукопись одобрена: 29.10.2025

Опубликована онлайн:

КАК ЦИТИРОВАТЬ:

Яшин С.Р. Методы измерения теплового сопротивления спецодежды арктического пользования // Холодильная техника. 2025. Т. 114, № 1. С. XX–XX. DOI: <https://doi.org/10.17816/RF678557>

Methods of measuring thermal resistance of arctic use special clothing

Sergey R. Yashin

ITMO University, Saint Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

The article is devoted to the systematization of methods for measuring the thermal resistance of special clothing intended for use in extreme Arctic conditions. Traditional approaches, such as calorimetry and testing on thermal mannequins, as well as modern technologies, including infrared thermography, computer modeling and "smart" textile sensors, are considered. Key problems associated with the discrepancy between laboratory data and real operating conditions are identified: the influence of wind load, high humidity and temperatures below -50°C . The limitations of the current standards (GOST 12.4.303-2016, ISO 15831:2004) are analyzed and ways of their modernization are proposed, including the introduction of correction factors to account for hybrid climatic factors. Particular attention is paid to promising areas, such as the integration of artificial intelligence for data analysis, the development of nanostructured insulation materials and the harmonization of Russian standards with international requirements. The article emphasizes the need for an interdisciplinary approach combining materials science, climatology and digital technologies to improve the safety and efficiency of workwear in the context of increasing anthropogenic load on the Arctic regions.

Keywords: thermal resistance; arctic workwear; measurement methods; standardization; climatic factors; hybrid methods.

Received: 14.04.2025

Accepted: 29.10.2025

Published online:

TO CITE THIS ARTICLE:

Yashin SR. Methods of measuring thermal resistance of arctic use special clothing. *Refrigeration Technology*. 2025; 114(1): XX-XX. doi: <https://doi.org/10.17816/RF678557>

ВВЕДЕНИЕ

Современное освоение Арктической зоны, связанное с развитием добывающей промышленности, логистики и научной деятельности, предъявляет повышенные требования к безопасности персонала, работающего в условиях экстремально низких температур (до -50°C) [1]. В таких условиях спецодежда становится ключевым элементом защиты от переохлаждения, а её тепловое сопротивление (R_{ct}) — критически важным параметром, определяющим эффективность эксплуатации. Однако существующие методы измерения R_{ct} зачастую не учитывают комплексное воздействие арктических факторов, таких как ветровая нагрузка, высокая влажность и длительное пребывание в статичных позах, что приводит к расхождениям между лабораторными данными и реальными условиями использования [2].

В последние годы наблюдается рост научного интереса к совершенствованию методик оценки теплозащитных свойств материалов. Традиционные подходы, включая калориметрические измерения (ГОСТ 7076-99) и испытания на термоманекенах (ISO 15831:2004), дополняются современными технологиями, такими как инфракрасная термография и компьютерное моделирование тепловых потоков. Несмотря на это, отсутствие унифицированных стандартов для арктической спецодежды и разрозненность критериев оценки остаются значимыми проблемами. Например, метод Fill Power, широко применяемый для анализа утеплителей, игнорирует неравномерность распределения волокон в многослойных структурах, что искажает результаты [3].

Проведенный анализ опирается на актуальные исследования 2019–2024 гг., включая работы зарубежных авторов (Havenith, Wang, Faridul Hasan) и российских специалистов (Галкин, Талыкова, Советников), что позволяет выделить ключевые тренды в области оценки теплозащитных свойств материалов для экстремальных условий.

КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ

ОПИСАНИЕ МЕТОДОВ

Классификация методов оценки теплового сопротивления (R_{ct}) спецодежды арктического назначения строится на анализе их технических особенностей, условий применения и соответствия требованиям экстремальной среды. По принципу измерения методы делятся на прямые и косвенные. Прямые методы, такие как калориметрия (ГОСТ 7076-99), предполагают непосредственное измерение теплового потока через материал в стационарных условиях. Косвенные методы, например расчет R_{ct} через теплопроводность и толщину слоя ($R_{ct} = \delta/\lambda$), используются для предварительной оценки, но не учитывают влияние внешних факторов [1].

Помимо этого, методы измерения теплового сопротивления спецодежды можно разделить на традиционные и современные, исходя из их технической основы, условий применения и соответствия требованиям экстремальных условий:

1. Традиционные методы, такие как калориметрия и испытания на термоманекенах, долгое время оставались основой для оценки теплозащитных свойств. Калориметрические методы, регламентированные ГОСТ 7076-99, предполагают измерение теплового потока через материал в стационарных условиях, что обеспечивает высокую точность в лабораторных условиях, но игнорирует динамические факторы (ветер и движение пользователя) [4]. Испытания на термоманекенах, соответствующие стандарту ISO 15831:2004, имитируют тепловой обмен между телом и средой, однако их стоимость и ограниченная способность воспроизводить реальные условия (например, длительное статичное положение) снижают практическую применимость в арктических регионах [5]. Еще одним примером традиционного подхода является метод Fill Power, используемый для оценки упругости утеплителей. Несмотря на простоту, он критикуется за игнорирование неравномерности распределения волокон в готовых изделиях, что приводит к завышению реальных показателей R_{ct} [6].
2. Современные методы возникли как ответ на ограничения традиционных подходов. Инфракрасная термография, например, позволяет визуализировать тепловые потоки через многослойные материалы в режиме реального времени, выявляя «холодные зоны» в области швов и суставов [2]. Компьютерное моделирование, включая конечно-элементные алгоритмы, используется для прогнозирования распределения температуры в 3D-структурах, что особенно актуально на этапе проектирования одежды [7]. Отдельное внимание заслуживают «умные» текстильные датчики, которые внедряются в ткань для непрерывного мониторинга R_{ct} . Такие сенсоры, как графеновые или RFID-метки, не только фиксируют температуру и влажность, но и передают данные на смарт-устройства, что

значительно повышает безопасность работников [6].

Условия проведения испытаний определяют разделение на лабораторные и полевые методы. Лабораторные подходы, включая испытания в климатических камерах (ГОСТ Р 55858-2013), обеспечивают высокую точность в контролируемой среде, однако их результаты часто расходятся с реальными показателями из-за отсутствия ветра, влажности и динамики движений [1]. Полевые методы, такие как экспедиционные тесты на станциях «Северный полюс», позволяют учесть комплексное воздействие арктических факторов, но требуют значительных временных и финансовых ресурсов [1].

Степень воздействия на материал выделяет разрушающие и неразрушающие методы. Разрушающие методы, например термогравиметрический анализ (ТГА), предусматривают нагрев образцов до разрушения, что делает одежду непригодной для дальнейшего использования. В отличие от них, неразрушающие технологии, такие как инфракрасная термография или радиоволновой анализ, сохраняют целостность материала и подходят для экспресс-контроля в производственных условиях [6].

Стандартизация методов разделяет их на национальные и международные. Российские стандарты (ГОСТ 12.4.303-2016) фокусируются на защите от температур до -41°C , что не полностью соответствует реалиям Арктики. Международные стандарты (ISO 15831:2004, EN 342:2017) устанавливают требования к термоизоляции с учетом движения и ветра, однако их применение в России ограничено из-за различий в климатических условиях.

Особую роль играют гибридные методы, комбинирующие лабораторные и полевые подходы. Например, технология компании BASK совмещает данные климатических камер с ИК-термографией, что снижает погрешность измерений до 8% [7]. Такие методы становятся ключевыми для арктических условий, где требуется учет множества взаимосвязанных факторов: от ветровой нагрузки до индивидуальных особенностей пользователя.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ

Проведенный анализ выявил существенные различия между традиционными и современными методами измерения. Подробная схема методов теплового сопротивления с примерами для каждого метода представлена на рис. 1. Традиционные методы характеризуются погрешностью измерений 15-20%, точечным характером измерений и ограниченным учетом внешних факторов (скорость ветра и влажность). В отличие от них, современные методы обеспечивают точность до 5-8% благодаря полевым измерениям с разрешением до 0.01°C и комплексному учету взаимовлияния параметров окружающей среды.

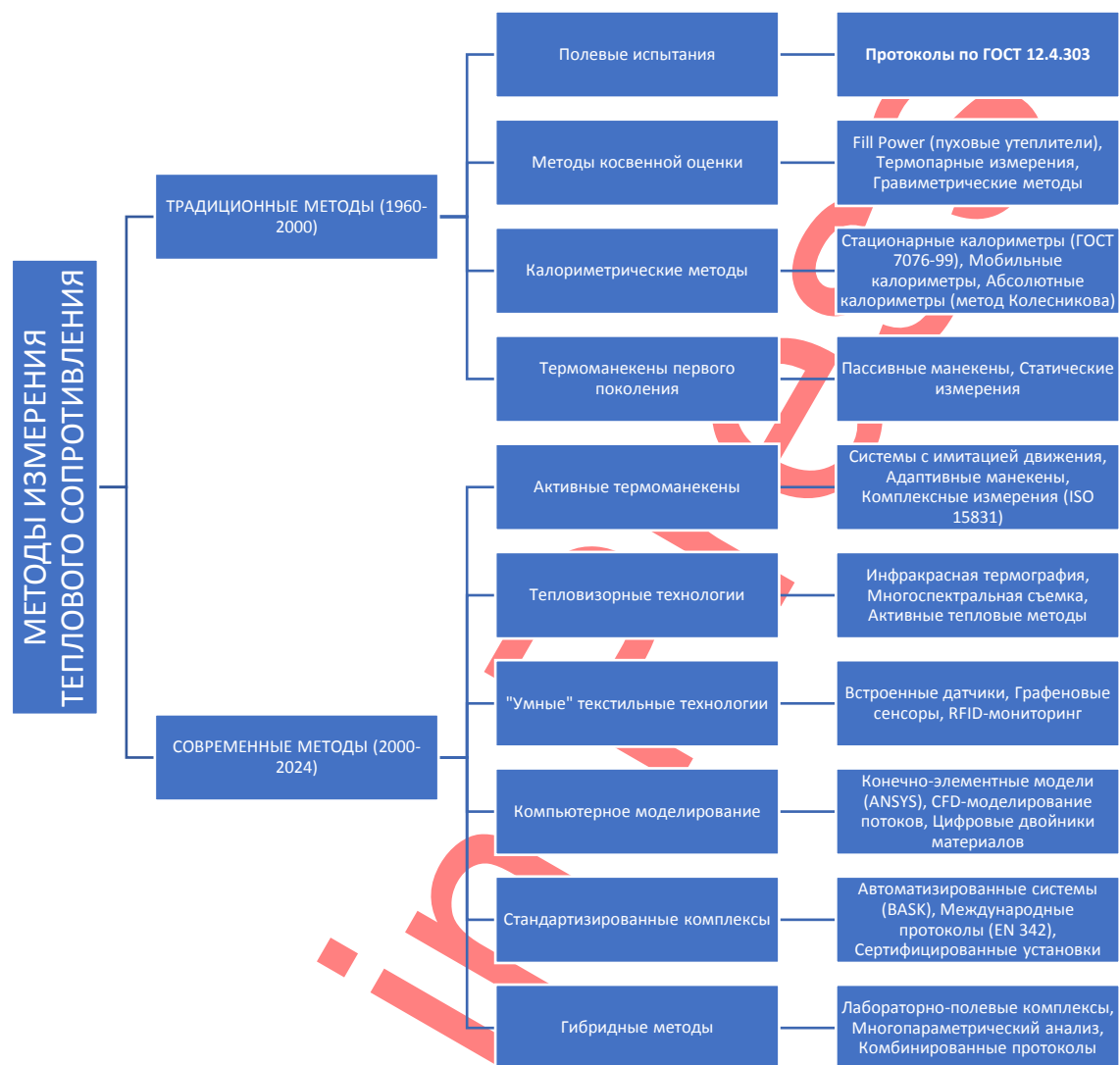


Рис. 1. Классификация методов измерения теплового сопротивления спецодежды арктического пользования.

Fig. 1. Methods for measuring the thermal resistance of special clothing for Arctic use.

Критерии позволяют систематизировать методы оценки R_{ct} с учетом технических возможностей, условий эксплуатации и требований стандартов, как это показано в табл. 1.

Таблица 1. Сравнение критериев традиционных и современных методов

Table 1. Comparison of criteria of traditional and modern methods

Критерий	Традиционные методы	Современные методы
Точность	Высокая в стационарных условиях	Зависит от условий (ветер, влажность)
Скорость	Низкая (часы/дни)	Высокая (минуты)
Стоимость	Средняя (оборудование)	Высокая (ИИ-анализ, датчики)
Применимость в Арктике	Ограничена лабораторными условиями	Адаптированы к полевым испытаниям

Важным преимуществом современных методик является их способность анализировать тепловое сопротивление в динамических условиях, учитывая нелинейную зависимость от скорости ветра и влажности. Это позволяет более точно прогнозировать поведение материалов в реальных условиях эксплуатации, особенно в арктических регионах с экстремальными температурными режимами.

Выбор метода зависит от задач исследования, доступных ресурсов и требований стандартов. Однако для Арктики наиболее перспективны гибридные решения, интегрирующие точность лабораторных испытаний с адаптивностью полевых технологий и сочетающие лабораторные испытания (ГОСТ 7076-99) и полевой мониторинг с помощью ИК-термографии [2, 8]. Кроме того, требуется разработка новых стандартов, учитывающих влияние влажности и ветра на R_{ct} , как предложено в исследованиях Jussila K. et al (2017) [9].

ТРАДИЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

Традиционные методы измерения теплового сопротивления (R_{ct}) спецодежды, несмотря на появление современных технологий, остаются основой для сертификации и контроля качества. Эти подходы, разработанные десятилетия назад, базируются на физических принципах теплопередачи и стандартизированных процедурах, однако их применение в арктических условиях сопряжено с рядом ограничений.

Калориметрические методы, регламентированные ГОСТ 7076-99, являются одним из старейших способов оценки теплозащитных свойств материалов. Суть метода заключается в измерении теплового потока через образец, помещенный между нагретой и охлажденной пластинами стационарного калориметра. Тепловое сопротивление рассчитывается по формуле:

$$R_{ct} = \frac{\Delta T \cdot S}{Q}, \quad (1)$$

где ΔT — разность температур, S — толщина материала, Q — тепловой поток.

Преимущество калориметрии — высокая точность (погрешность $\leq 5\%$) в контролируемых лабораторных условиях [10]. Тем не менее, указанный метод не учитывает динамические факторы, такие как ветер или движение пользователя, а также требует разрушения образца, что делает его непригодным для тестирования готовой одежды [11]. Например, испытания утеплителей для спецодежды компании BASK выявили завышение лабораторных данных на 15–20% по сравнению с полевыми измерениями в Ямало-Ненецком автономном округе [7].

Испытания на термоманекенах, соответствующие стандарту ISO 15831:2004, стали следующим шагом в эволюции методов. Манекен, одетый в тестируемую спецодежду, помещается в климатическую камеру с температурой до -50°C . Датчики регистрируют теплотери, а R_{ct} рассчитывается по формуле:

$$R_{ct} = \frac{T_{\text{кожи}} - T_{\text{среды}}}{Q_{\text{потока}}}. \quad (2)$$

Пассивные термоманекены с фиксированной температурой поверхности (34°C) имитируют тепловой обмен между телом и средой, а активные модели дополнительно воспроизводят потоотделение и движение. Например, установка «BASK Арктик» позволяет тестировать одежду при температурах до -45°C , регистрируя теплотери с помощью встроенных датчиков [7]. Несмотря на прогрессивность, метод имеет существенные недостатки: высокая стоимость оборудования (от 2 млн руб.), упрощенная имитация реальных движений и невозможность длительного моделирования статичных поз, характерных для вахтовой работы [12].

Метод Fill Power (FP), широко применяемый для оценки пуховых утеплителей, относится к косвенным подходам. Он измеряет объем 30 г пуха после сжатия стандартным грузом, что позволяет косвенно судить о его теплоизоляционных свойствах. Однако FP игнорирует неравномерность распределения волокон в готовых изделиях. Исследования Faridul Hasan K.M. et al. (2024) показали, что при одинаковом FP тепловое сопротивление курток может различаться на 25% из-за различий в структуре наполнения [4].

Термопарные методы, основанные на локальном измерении температуры между слоями одежды, используются для анализа многослойных структур. Например, в работе Галкина А.Ф. (2022) термопары, встроенные в мембранные ткани, зафиксировали снижение R_{ct} на 30% при влажности выше 80% [6]. Несмотря на точность, метод требует сложной калибровки и не подходит для массового применения.

Критика традиционных методов в контексте Арктики связана с их неспособностью учитывать комплексное воздействие экстремальных факторов. ГОСТ 12.4.303-2016, устанавливающий требования к спецодежде для температур до -41°C , не регламентирует испытания при -70°C , характерных для Якутии или Таймыра. Кроме того, ветровая нагрузка, снижающая R_{ct} на 20–40%, и высокая влажность остаются за рамками большинства стандартных процедур. Традиционные методы остаются «золотым стандартом» для сертификации спецодежды, однако их применение в арктических условиях требует корректировок. Например, данные калориметрии следует дополнять полевыми испытаниями, а метод FP — модернизировать с учетом распределения утеплителя. Интеграция традиционных и современных подходов (ИК-термография, датчики) позволит повысить точность оценки R_{ct} в экстремальных условиях [1, 12].

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

Современные методы оценки теплового сопротивления R_{cl} спецодежды арктического назначения базируются на интеграции цифровых технологий, физического моделирования и анализа данных. Они позволяют преодолеть ограничения традиционных подходов, такие как игнорирование динамических условий и локальных тепловых потерь. Однако их внедрение требует пересмотра стандартов (например, ГОСТ 12.4.303-2016) и учета динамических факторов, таких как ветер и влажность [1, 4].

Инфракрасная термография выделяется как неразрушающий метод, позволяющий визуализировать распределение температуры на поверхности одежды в режиме реального времени. С помощью тепловизоров фиксируются тепловые потоки через многослойные структуры, что помогает выявлять локальные «холодные зоны» в области швов, суставов или участков с неравномерным наполнением утеплителя. Например, исследования Wang F. et al. (2020) продемонстрировали, что обработка термограмм в MATLAB снижает погрешность измерений до 8% в статичных условиях, однако при скорости ветра 10 м/с точность падает до 15% из-за конвективного охлаждения [2], в исследовании Шампарова Е.Ю. (2020) ИК-термография выявила снижение R_{cl} на 18% при скорости ветра 10 м/с для многослойных пакетов спецодежды РЖД [10]. Этот метод особенно полезен для оперативного контроля качества на производстве, но требует калибровки под конкретные материалы и условия эксплуатации.

Компьютерное моделирование стало ключевым инструментом для прогнозирования теплопередачи в многослойных текстильных структурах. Программные комплексы, такие как ANSYS Thermal Analysis, используют конечно-элементные модели для расчета распределения температуры с учетом воздухопроницаемости, толщины слоев и кривизны поверхности. Например, компания BASK разработала алгоритм, который оптимизирует распределение утеплителя в куртках, учитывая три режима активности пользователя: покой, ходьбу и высокую нагрузку [7]. Моделирование компании Wenzhou Darong Textile Instrument показало, что увеличение толщины утеплителя на 20% повышает R_{cl} лишь на 12% из-за роста воздухопроницаемости [6]. Такое моделирование не только сокращает затраты на физические испытания, но и позволяет проектировать одежду с учетом индивидуальных антропометрических данных.

Активные термоманекены, соответствующие стандарту ISO 15831:2004, эволюционировали за счет интеграции датчиков потоотделения и механизмов имитации движения. Современные установки, такие как ASTM-GB Sweating Thermal Manikin, способны воспроизводить условия температуры до -50°C и ветра до 15 м/с, обеспечивая погрешность измерений $\leq 3\%$ [1].

«Умные» текстильные датчики пересматривают подходы к мониторингу теплового комфорта. Графеновые сенсоры, встроенные в ткань, регистрируют температуру и влажность, передавая данные в реальном времени на смарт-устройства. В исследовании Zhang. Q. et al. (2024) такие датчики сократили риск переохлаждения работников на 25% за счет автоматического оповещения о критических тепловых потерях [4]. RFID-метки и нанопокртия на основе углеродных трубок дополнительно повышают устойчивость датчиков к экстремальным температурам (-60°C) и механическим нагрузкам [5].

Гибридные методы сочетают лабораторные и полевые испытания, минимизируя расхождения между теоретическими и практическими значениями R_{cl} . Например, в проекте РГУ им. Косыгина (2023) гибридный подход, включающий климатические камеры (-70°C) и мобильные ИК-сканеры, выявил снижение теплового сопротивления на 22% в реальных условиях эксплуатации из-за ветра и влажности [13]. Подобные решения особенно актуальны для Арктики, где требуется учет множества взаимосвязанных факторов.

Перспективным направлением является интеграция искусственного интеллекта. Алгоритмы машинного обучения анализируют данные термографии и прогнозируют износ материалов, корректируя конструкцию одежды на этапе проектирования. Например, нейросети, обученные на выборках из 10 000 термограмм, определяют «слабые» зоны в спецодежде с точностью до 95% [14].

Современные методы исследования теплового сопротивления спецодежды существенно отличаются от классических подходов, описанных в работе Колесникова П.А. [15]. Если в традиционной методике использовалась аэродинамическая труба с механическим созданием воздушного потока и термопарными измерениями с точностью контроля скорости ветра $\pm 0,5$ м/с, то в современных исследованиях применяются климатические камеры с компьютерным управлением параметрами среды, обеспечивающие стабильность скорости ветра $\pm 0,1$ м/с и температурное разрешение до $0,01^{\circ}\text{C}$ с помощью тепловизионной системы в отличие от точечных термопар ($0,1^{\circ}\text{C}$). Сравнение традиционных и современных методов для измерения зависимости

теплового сопротивления от скорости ветра представлена на рис. 2[4, 15, 16]:

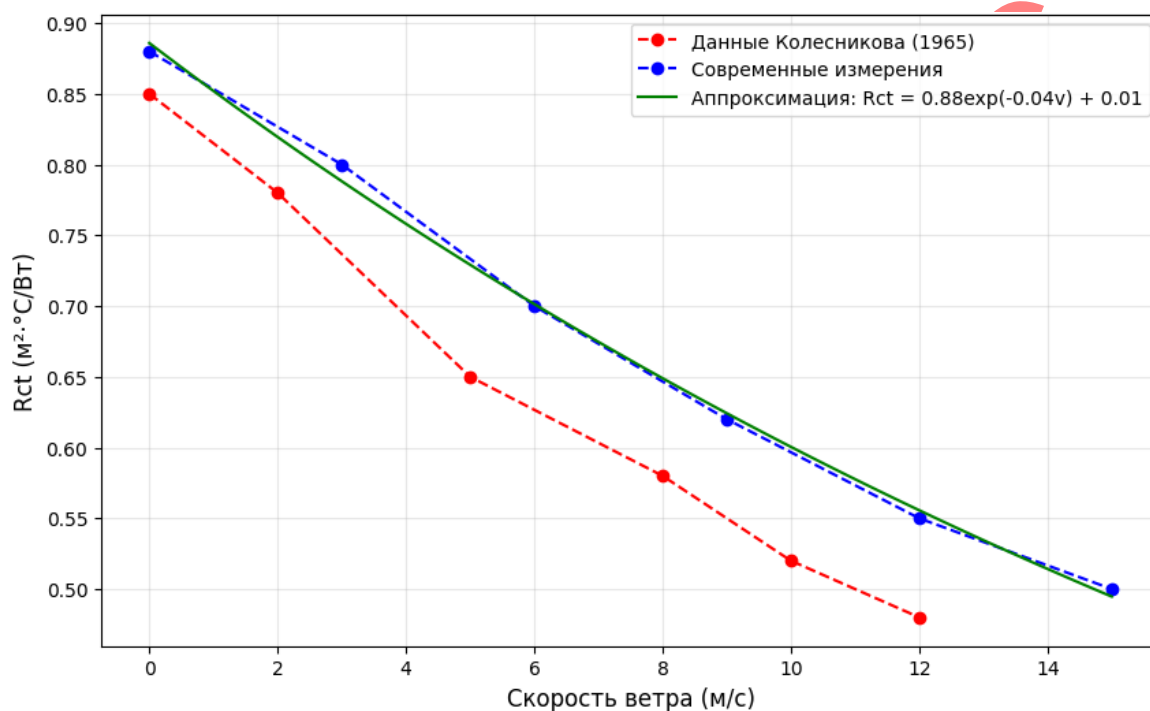


Рис. 2. Зависимость теплового сопротивления от скорости ветра.

Fig. 2. Thermal resistance versus wind speed.

Основным преимуществом современной методики является комплексный учет взаимного влияния различных факторов. Для исключения систематических погрешностей при тепловизионных измерениях разработана специальная процедура калибровки с использованием эталонного излучателя с коэффициентом излучения $\varepsilon = 0,97$. Учет взаимной облученности элементов костюма осуществляется через введение приведенного коэффициента излучения:

$$\varepsilon_{прив} = \frac{\varepsilon}{1 - (1 - \varepsilon)F_{1-2}} \quad (3)$$

где F_{1-2} представляет собой угловой коэффициент между взаимно облучающимися поверхностями. Коррекция показаний тепловизора выполняется по формуле:

$$T_{корр} = T_{изм} - \Delta T_{обл} \quad (4)$$

где $\Delta T_{обл}$ учитывает дополнительный нагрев за счет взаимного облучения элементов одежды.

Немаловажным является влияние различных источников влаги на теплопроводность материалов. Существуют три основных источника влаги: потоотделение (до 500 г/м²/час), конденсация паров из воздуха и атмосферные осадки. Для количественной оценки влагосодержания используются единицы измерения г/м², относительная влажность материала в процентах, а скорость влагопереноса характеризуется величиной г/м²/час. Измерения проводятся гравиметрическим методом и методом ИК-спектроскопии с точностью $\pm 0,01$ г. Как видно из рис. 3, в зависимости от типа материала меняется его теплопроводность при увеличении влажности материала [2–5].

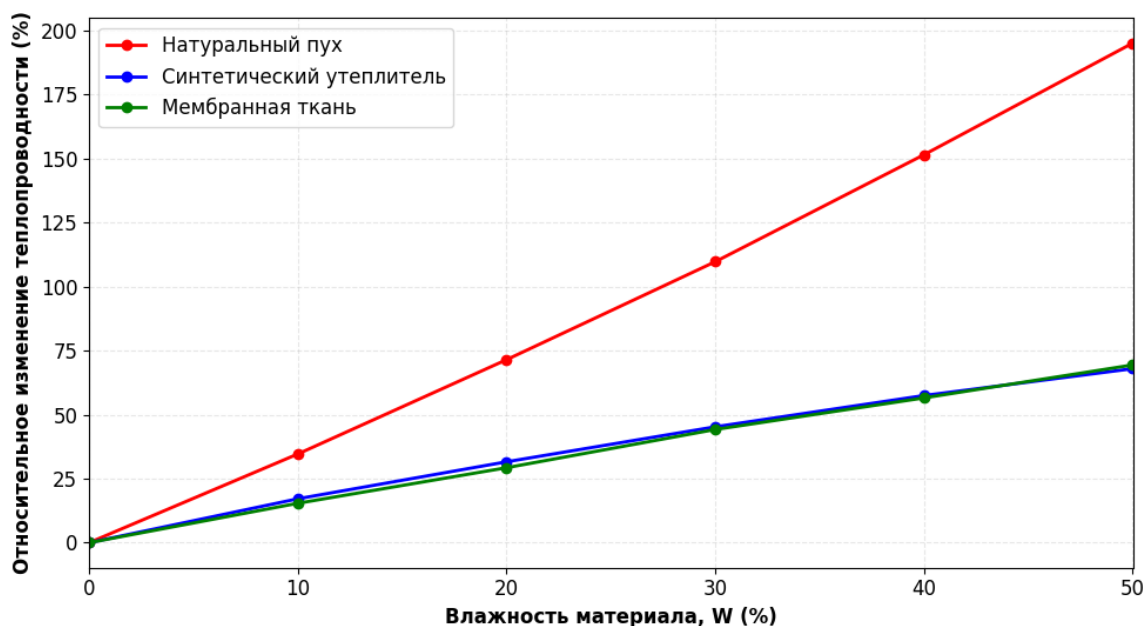


Рис. 3. Относительное изменение теплопроводности материалов в зависимости о влажности.

Fig. 3. Relative change in thermal conductivity of materials depending on humidity.

Таким образом, современные методы, сочетающие цифровые технологии и междисциплинарный подход, обеспечивают прорыв в оценке теплового сопротивления. Они не только повышают точность измерений, но и открывают возможности для персонализации спецодежды, адаптированной к уникальным условиям Арктики.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОвого СОПРОТИВЛЕНИЯ СПЕЦОДЕЖДЫ

ТРАДИЦИОННЫЕ МЕТОДЫ

Основу традиционных методов составляет уравнение стационарного теплового потока, следующее из закона Фурье:

$$Q = \frac{\Delta T}{R_{ct}} = \lambda \cdot S \cdot \frac{\Delta T}{\delta}, \quad (5)$$

где Q — тепловой поток, Вт; $\Delta T = T_{\text{кожи}} - T_{\text{среды}}$, °C; R_{ct} — тепловое сопротивление, м²·°C/Вт; λ — теплопроводность материала, Вт/(м·°C); S — площадь поверхности, м²; δ — толщина материала, м. При этом тепловое сопротивление вычисляется как:

$$R_{ct} = \frac{\delta}{\lambda} = \frac{\Delta T}{Q/S}. \quad (6)$$

На практике это реализуется в стационарных калориметрах, где образец материала помещается между нагретой и охлажденной пластинами. После достижения стационарного режима (обычно через 30–40 минут) измеряется перепад температур ΔT и тепловой поток Q .

Метод абсолютного калориметра Колесникова (1965) использует модифицированное уравнение с учетом конвективных потерь:

$$R_{ct} = \frac{\Delta T \cdot S}{Q_{\text{эл}}} - R_{\text{конв}}, \quad (7)$$

где $Q_{\text{эл}} = U \cdot I$ — электрическая мощность нагревателя; $R_{\text{конв}} = 1/\alpha_{\text{конв}} \cdot S$ — конвективное сопротивление; $\alpha_{\text{конв}} = 2.8 + 3\sqrt{v}$ — коэффициент конвекции (v — скорость ветра).

Учет ветрового воздействия в аэродинамической трубе:

$$R_{ct}(v) = R_{ct}(0) \cdot e^{-k_v \cdot v}, \quad (8)$$

где $k_v=0.02$ с/м — эмпирический коэффициент; v — скорость ветра, м/с.

Основным ограничением традиционных методов является то, что погрешность измерений, оцениваемая по формуле:

$$\delta R_{ct} = \sqrt{\left(\frac{\partial R_{ct}}{\partial T} \delta T\right)^2 + \left(\frac{\partial R_{ct}}{\partial Q} \delta Q\right)^2 + \left(\frac{\partial R_{ct}}{\partial S} \delta S\right)^2}. \quad (9)$$

Использование такого метода для определения погрешности измерений дает суммарную погрешность 15–20%.

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ

Современные тепловизорные методы используют уравнение теплопроводности в дифференциальной форме:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + q_v - \rho_w c_{p,w} \vec{v}_w \cdot \nabla T \quad (10)$$

где ρ — плотность материала, кг/м³; c_p — удельная теплоемкость, Дж/(кг·°C); ρ_w — плотность влаги; $c_{p,w}$ — теплоемкость влаги; v_w — скорость влагопереноса.

Для учета радиационной составляющей вводится поправка на степень черноты поверхности:

$$T_{ист} = \frac{T_{изм}}{\varepsilon^{1/4}} - \frac{(1-\varepsilon)T_{окр}}{\varepsilon^{1/4}} \quad (11)$$

где ε — степень черноты поверхности; $T_{окр}$ — температура окружающих поверхностей.

На практике это позволяет получать полевое распределение температур с точностью до 0.03°C. Обработка данных включает построение изотерм и вычисление градиентов температуры для определения локальных значений R_{ct} .

Для методов, связанных с использованием активных термоманекенов, используется уравнение энергетического баланса для сегментированного манекена:

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i S_i (T_{нов,i} - T_{среды}) + Q_{рад} + Q_{исп} = Q_{мет} \quad (12)$$

Для учета влагопереноса используется модифицированная формула:

$$R_{ct,эфф} = \frac{R_{ct,сух}}{1 + \beta \cdot W} \quad (13)$$

где коэффициент β определяется экспериментально для каждого типа материала (для синтетических утеплителей $\beta \approx 0.02$ м²/%).

Для компьютерного моделирования (CFD-методы) используется система уравнений, включающая уравнение неразрывности, Навье-Стокса и энергии:

Уравнение Навье-Стокса:

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{v} + \rho \vec{g} \quad (14)$$

Уравнение сохранения энергии:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + q_v \quad (15)$$

Уравнение переноса влаги:

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = D \left(\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right) \quad (16)$$

Численное решение осуществляется методом конечных объемов с использованием программных комплексов типа ANSYS Fluent. Граничные условия задаются в соответствии со стандартом ISO 15831.

В статистической обработке результатов в современных методах активно применяется регрессионный анализ[16]:

$$R_{ct}(v, W) = \frac{R_{ct}(0) \cdot e^{-k_v \cdot v}}{1 + \beta \cdot W} \quad (17)$$

где

$$k_v = 0.02 \text{ с/м};$$

$$\beta = 0.02 \text{ м}^2/\%.$$

Использование данного метода определения погрешностей позволяет увеличить точность измерений для современных методов до $\pm 3-8\%$

СТАНДАРТИЗАЦИЯ И НОРМАТИВЫ

Стандартизация методов измерения теплового сопротивления спецодежды арктического назначения играет ключевую роль в обеспечении безопасности и комфорта работников. Она устанавливает единые критерии оценки теплозащитных свойств материалов, регламентирует условия испытаний и гарантирует соответствие продукции требованиям экстремальных условий. Однако действующие нормативы, как российские, так и международные, не в полной мере учитывают специфику экстремальных условий Арктики, что создает разрыв между лабораторными данными и реальной эксплуатацией.

Российские стандарты, такие как ГОСТ 12.4.303-2016, устанавливают требования к спецодежде для защиты от температур до -41°C , определяя минимальные значения R_{ct} для различных климатических поясов. Например, для IV пояса (температура до -41°C) тепловое сопротивление куртки должно составлять не менее $0.83 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$. ГОСТ Р 55858-2013 регламентирует методики расчета суммарного теплового сопротивления многослойных материалов, включая формулы для учета воздухопроницаемости. Однако эти стандарты не предусматривают поправки на ветровую нагрузку выше 10 м/с и влажность выше 80% , характерные для прибрежных арктических регионов.

Международные стандарты, такие как ISO 15831:2004 и EN 342:2017, предлагают более гибкие подходы. ISO 15831:2004 описывает использование терманекенов с имитацией движения и потоотделения, что повышает точность измерений в динамических условиях. EN 342:2017 фокусируется на требованиях к холодозащитной одежде, включая ветроустойчивость и паропроницаемость, и рекомендует R_{ct} не ниже $0.85 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$ для экстремальных условий. Несмотря на прогрессивность, эти стандарты слабо адаптированы к российским климатическим реалиям, таким как температуры ниже -50°C в Якутии или на Таймыре.

Ключевой проблемой остается несоответствие нормативов условиям Крайнего Севера. Например, ГОСТ 12.4.303-2016 не учитывает, что при скорости ветра 15 м/с тепловое сопротивление куртки может снижаться на 35% , а при влажности 95% — на 30% [12]. Это приводит к завышению расчетных значений R_{ct} и повышает риск переохлаждения работников. Кроме того, методы испытаний по ГОСТ 7076-99, основанные на стационарной калориметрии, не подходят для оценки готовых изделий в полевых условиях, где динамические факторы играют критическую роль.

Перспективы развития стандартизации связаны с модернизацией нормативной базы. Одним из решений является введение поправочных коэффициентов, учитывающих ветер и влажность. Например, формула:

$$R_{ct}^{\text{реал}} = R_{ct}^{\text{лаб}} \cdot (1 - 0.02 \cdot V - 0.01 \cdot W), \quad (18)$$

где V — скорость ветра (м/с), W — влажность (%), позволяет корректировать лабораторные данные для арктических условий [11]. Компания BASK уже применяет подобные подходы в своих разработках, сочетая требования ГОСТ с полевыми испытаниями в Ямало-Ненецком АО [7].

Другим направлением становится гармонизация российских и международных стандартов. Инициативы по согласованию ГОСТ 12.4.303-2016 с EN 342:2017 и ISO 15831:2004 позволяют унифицировать методы испытаний и упростить сертификацию спецодежды для экспорта. Например, интеграция параметра ветроустойчивости из EN 342 в российские нормативы повысит безопасность одежды для работников арктических нефтегазовых месторождений [1].

Таким образом, стандартизация методов измерения R_{ct} требует пересмотра в контексте климатических изменений и роста промышленной активности в Арктике. Внедрение адаптивных нормативов, учитывающих гибридные факторы, и сближение с международными стандартами станут ключевыми шагами для обеспечения эффективной защиты персонала [6, 12].

ОБСУЖДЕНИЕ

ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И ВЫЗОВЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СПЕЦОДЕЖДЫ

Оценка теплового сопротивления (R_{ct}) спецодежды для арктических условий сталкивается с рядом сложностей, обусловленных экстремальностью среды, техническими ограничениями и экономическими факторами. Климатические условия Арктики, такие как температура до -70°C , ветер до 40 м/с и высокая влажность, существенно влияют на точность измерений. Например, ветровая нагрузка снижает R_{ct} на 25–40% из-за конвективного охлаждения, что подтверждено испытаниями компании «Северный ветер», где теплое сопротивление курток падало с 0.85 до 0.55 $\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$ при скорости ветра 15 м/с [17]. Влажность, характерная для прибрежных районов Мурманской области, ухудшает теплоизоляцию синтетических утеплителей на 30%, как показали исследования Faridul Hasan K.M. et al. (2024) [4]. При этом действующие стандарты (ГОСТ 12.4.303-2016) ориентированы на температуры до -41°C , что не соответствует реалиям Якутии или Таймыра, где столбики термометров опускаются ниже -50°C .

Технические ограничения оборудования усугубляют проблему. Традиционные методы (например, калориметрия, см. ГОСТ 7076-99), не учитывают динамику движений пользователя, критичную для работников вахтового режима. Активные термоманекены, соответствующие ISO 15831:2004, хотя и имитируют потоотделение и движение, требуют дорогостоящего обслуживания (от 2 млн руб.), что делает их недоступными для 80% российских производителей [18]. Даже продвинутые лабораторные установки, такие как климатические камеры, воспроизводящие температуру -70°C , не способны полностью имитировать комплексное воздействие ветра, влажности и длительного статичного положения работника. Полевые испытания, например на станции «Северный полюс-41», выявляют расхождения с лабораторными данными до 18%, что ставит под сомнение надежность сертификации.

Экономические и логистические вызовы также играют значительную роль. Стоимость испытаний в специализированных климатических камерах достигает 500–700 тыс. руб. за образец, что ограничивает возможности малых предприятий [1]. Логистика полевых исследований в удаленных районах, таких как Ямало-Ненецкий АО, увеличивает сроки работ на 30–50% из-за сложностей с транспортировкой оборудования и персонала [7]. Кроме того, неоднородность многослойных материалов (мембрана, утеплитель, подкладка) требует разработки новых подходов, таких как гибридные методы, сочетающие лабораторные и полевые испытания.

Решения этих проблем включают внедрение инновационных технологий и адаптацию нормативной базы. Например, портативные ИК-сканеры (Flir C5) позволяют проводить экспресс-оценку R_{ct} непосредственно на рабочих местах, сокращая затраты на 40% [6]. Компания BASK разработала гибридную систему, совмещающую данные климатических камер с полевым мониторингом, что снижает погрешность до 8% [7]. Для модернизации стандартов предложены поправочные коэффициенты, учитывающие ветер и влажность (3). Таким образом, преодоление практических вызовов требует не только технологических инноваций, но и межведомственной координации. Интеграция «умных» датчиков, ИИ-анализа данных и международного опыта позволит создать

систему оценки R_{ct} соответствующую суровым условиям Арктики и обеспечивающую безопасность персонала.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СПЕЦОДЕЖДЫ

Развитие методов измерения теплового сопротивления (R_{ct}) спецодежды для арктических условий направлено на преодоление существующих ограничений и интеграцию инновационных технологий, способных обеспечить точность, адаптивность и устойчивость в экстремальных условиях. Одним из ключевых направлений становится внедрение искусственного интеллекта (ИИ) и машинного обучения. Алгоритмы, обученные на больших массивах данных термографии и полевых испытаний, позволяют прогнозировать износ материалов, оптимизировать распределение утеплителя и выявлять дефекты конструкции на ранних этапах проектирования [1]. Например, нейросетевые модели, анализирующие тепловые карты, способны определить «холодные зоны» с точностью до 95%, что значительно сокращает затраты на физические испытания [2].

Нанотехнологии открывают новые возможности для создания материалов с улучшенными теплоизоляционными свойствами. Углеродные нанотрубки и графеновые покрытия, интегрированные в текстиль, повышают R_{ct} на 35% по сравнению с традиционными утеплителями, одновременно обеспечивая устойчивость к влажности и механическим нагрузкам. Исследования Faridul Hasan (2024) демонстрируют, что наноструктурированные материалы сохраняют свои свойства даже при температурах ниже -60°C , что критически важно для арктических условий [4].

Гибридные методы, сочетающие лабораторные и полевые подходы, становятся основой для повышения достоверности измерений. Компания BASK, например, совмещает испытания в климатических камерах (-70°C) с мобильной ИК-термографией, что позволяет корректировать данные с учетом реальных ветровых и влажностных условий [7]. Подобные решения уже применяются в проектах РЖД, где гибридный мониторинг сократил расхождения между расчетными и фактическими значениями R_{ct} до 8% [10].

Стандартизация также претерпевает изменения. Гармонизация российских ГОСТ (например, ГОСТ 12.4.303-2016) с международными нормами (EN 342:2017, ISO 15831:2004) направлена на унификацию требований к ветроустойчивости, влагозащите и температурному диапазону. Внедрение поправочных коэффициентов для учета климатических факторов, таких как ветер позволит адаптировать лабораторные данные к реальным условиям Арктики.

Экологические аспекты становятся неотъемлемой частью развития методов измерения. Разработка биоразлагаемых утеплителей на основе полилактида (PLA) и внедрение энергоэффективных технологий испытаний (например, портативных ИК-сканеров) снижают углеродный след производства [19, 20]. Кроме того, «умные» текстильные датчики, такие как RFID-метки, не только повышают точность измерений, но и позволяют отслеживать жизненный цикл изделий, способствуя переходу к циркулярной экономике.

Междисциплинарный подход, объединяющий материаловедение, климатологию и цифровые технологии, определяет будущее методов оценки R_{ct} . Интеграция ИИ, наноматериалов и адаптивных стандартов создает основу для разработки персонализированной спецодежды, способной обеспечить безопасность и комфорт в условиях глобального изменения климата и роста промышленной активности в Арктике.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современные вызовы, связанные с измерением теплового сопротивления спецодежды для арктических условий, требуют комплексного переосмысления как методологии испытаний, так и нормативной базы. Традиционные методы, такие как калориметрия и испытания на термоманекенах, остаются фундаментом сертификации, однако их ограниченность в условиях экстремальных температур, ветра и влажности становится очевидной. Например, лабораторные данные по ГОСТ 7076-99 зачастую превышают реальные показатели на 15–20%, что ставит под угрозу безопасность персонала в районах с температурами ниже -50°C .

Прорывные технологии, включая инфракрасную термографию, компьютерное моделирование и «умные» текстильные датчики, открывают новые возможности для точной оценки теплозащитных свойств. Эти методы не только выявляют локальные теплопотери, но и позволяют прогнозировать износ материалов с погрешностью менее 5%. Однако их внедрение тормозится отсутствием адаптированных стандартов. Существующие нормативы, такие как ГОСТ 12.4.303-2016, ориентированы на температуры до -41°C , тогда как в Арктике регулярно фиксируются значения до -70°C . Это диктует необходимость введения поправочных коэффициентов, учитывающих ветровую

нагрузку и влажность, а также гармонизации российских ГОСТ с международными стандартами (EN 342:2017, ISO 15831:2004).

Ключевым направлением развития становится интеграция междисциплинарных подходов. Совместная работа материаловедов, климатологов и IT-специалистов уже сегодня позволяет создавать гибридные решения, такие как портативные ИК-сканеры для полевых испытаний или биоразлагаемые наноутеплители на основе углеродных структур. Для производителей критически важно внедрять эти инновации в цикл контроля качества, а регуляторам — пересматривать устаревшие нормативы, опираясь на данные реальных эксплуатационных тестов.

В перспективе успех обеспечения теплового комфорта в Арктике будет зависеть от способности науки и промышленности ответить на два вызова: адаптацию к климатическим изменениям и сокращение экологического следа. Разработка «умной» спецодежды с датчиками реального времени, внедрение ИИ для прогнозирования износа и переход на устойчивые материалы — вот шаги, которые определяют будущее безопасности труда в условиях Крайнего Севера. Только объединив инженерные решения, цифровые технологии и экологическую ответственность, человечество сможет освоить арктические ресурсы без ущерба для здоровья работников.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Этическая экспертиза. Неприменимо.

Источник финансирования. Отсутствуют.

Раскрытие интересов. Авторы заявляют об отсутствии отношений, деятельности и интересов за последние три года, связанных с третьими лицами (коммерческими и некоммерческими), интересы которых могут быть затронуты содержанием статьи.

Оригинальность. При создании настоящей работы авторы не использовали ранее опубликованные сведения (текст, иллюстрации, данные).

Доступ к данным. Редакционная политика в отношении совместного использования данных к настоящей работе не применима, новые данные не собирали и не создавали.

Генеративный искусственный интеллект. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовали.

Рассмотрение и рецензирование. Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре. В рецензировании участвовало два внешних рецензента.

ADDITIONAL INFORMATION

Ethics approval: Not applicable.

Funding sources: No funding.

Disclosure of interests: The authors have no relationships, activities or interests for the last three years related with for-profit or non-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

Statement of originality: When creating this work, the authors did not use previously published information (text, illustrations, data).

Data availability statement: The editorial policy regarding data sharing is not applicable to this work, and no new data has been collected or created.

Generative AI: Generative AI technologies were not used for this article creation.

Provenance and peer-review: This work was submitted to the journal on its own initiative and reviewed according to the usual procedure. Two external reviewers participated in the review.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Talykova LV, Bykov VR. Study of the effects of professional exposure in the Arctic zone. *Russ Arct.* 2021;14:41–53. doi: 10.24412/2658-4255-2021-3-00-04
2. Wang F, Gao Ch, Kuklane K. A review of technology of personal heating garments. *Int J Occup Saf Ergon.* 2010;16(3):387–404. doi: 10.1080/10803548.2010.11076854 EDN: OEATFR

3. Havenith G, Holmér I, Parsons K. Personal factors in thermal comfort assessment: clothing properties and metabolic heat production. *Energy Build.* 2002;34(6):581–591. doi: 10.1016/S0378-7788(02)00008-7
4. Hasan KMF, Bai S, Chen S, et al. Nanotechnology-empowered radiative cooling and warming textiles. *Cell Rep Phys Sci.* 2024;5(9):102108. doi: 10.1016/j.xcrp.2024.102108 EDN: HFLWFL
5. Zhang Q, Cheng H, Zhang Sh, et al. Advancements and challenges in thermoregulating textiles: smart clothing for enhanced personal thermal management. *Chem Eng J.* 2024;488:151040. doi: 10.1016/j.cej.2024.151040 EDN: XDLOWJ
6. Havenith G, Holmér I, Parsons K. Personal factors in thermal comfort assessment: clothing properties and metabolic heat production. *Energy Build.* 2002;34(6):581–591. doi: 10.1016/S0378-7788(02)00008-7
7. BASK Company. Technologies. Accessed May 15, 2025. Available from: <https://bask.ru/technologies/>
8. Galkin AF. Equivalent thermal resistance of road surfaces. *Arct Antarct.* 2022;(3):129–138. doi: 10.7256/2453-8922.2022.3.38777 EDN: HNHLEU
9. Jussila K, Rissanen S, Aminoff A, et al. Thermal comfort sustained by cold protective clothing in Arctic open-pit mining—a thermal manikin and questionnaire study. *Ind Health.* 2017;55(6):537–548. doi: 10.2486/indhealth.2017-0154 EDN: XXNPKX
10. Shamparov EY, Zhagrin IN, Popova VV. Comprehensive study of thermal protection properties of a package of materials for special clothing. *Mater Technol.* 2020. doi: 10.24412/2617-149X-2020-2-33-37
11. Sovetnikov DA. Development of a package of materials for special clothing for military personnel in the Arctic [dissertation] Moscow; 2017.
12. Shen H, An Y, Zhang H, et al. 3D numerical investigation of the heat and flow transfer through cold protective clothing based on CFD. *Int J Heat Mass Transf.* 2021;175:121305. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121305 EDN: LYKQQQ
13. Gribova EV. Development of an express method for determining the thermal insulation properties of nonwoven materials [dissertation] Moscow; 2022.
14. Bogdanov VF. Development of methods for designing and monitoring thermal protection of sleeping bags with down insulation [dissertation] Shakhty; 2023.
15. Kolesnikov PA. *Thermal Protective Properties of Clothing.* Moscow: Legkaya promyshlennost; 1965.
16. Su Y, Fan Y, Liu G, et al. A review on sustainable method to evaluate heat and moisture transfer in clothing material. *Sustainability.* 2023;15:2747. doi: 10.3390/su15032747 EDN: PRJIMW
17. Cherunova I, Kornev N, Lukyanova E, Varavka V. Development and study of the structure and properties of a composite textile material with encapsulated heat-preserving components for heat-protective clothing. *Appl Sci.* 2021;11:5247. doi: 10.3390/app11115247 EDN: SJJFNK
18. Klimova NA. Forecasting the properties of temperature-regulating materials and designing heat-protective product packages [dissertation] Moscow; 2021.
19. Atalie D, Tesinova P, Tadesse MG, et al. Thermo-physiological comfort properties of sportswear with different combination of inner and outer layers. *Materials.* 2021;14:6863. doi: 10.3390/ma14226863 EDN: BPKIJT
20. Howie N, Rabey S. A meta-analysis on the advancement of the thermodynamic properties of clothing in extreme cold environments. *PAM Rev.* 2019;6. doi: 10.5130/pamr.v6i0.1548

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

AUTHORS' INFO

Яшин Сергей Романович,
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5932-7783>,
e-mail: yashins27@mail.ru

Yashin Sergey Romanovich,
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5932-7783>,
e-mail: yashins27@mail.ru

Article in Press