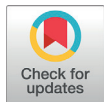


**ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ /
TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT**<https://doi.org/10.15507/2658-4123.036.202601.140-157>EDN: <https://elibrary.ru/ztdfzv>

УДК / UDK 628.8:001.8

*Оригинальная статья / Original article***Адаптивное управление микроклиматом
в кабине мобильного энергетического
средства на основе прогнозирования методом
экспоненциального сглаживания****А. П. Савельев¹, Н. И. Джабборов², С. А. Петров³✉**¹ *Национальный исследовательский
Мордовский государственный университет,
г. Саранск, Российская Федерация, <https://ror.org/0262qgk29>*² *Институт агроинженерных и экологических проблем
сельскохозяйственного производства –
филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация,
<https://ror.org/05fhdzx69>*³ *Тверская государственная сельскохозяйственная академия,
г. Тверь, Российская Федерация, <https://ror.org/0211wgq19>*✉ retrovmolokovo@yandex.ru*Аннотация*

Введение. Поддержание оптимальных микроклиматических условий в кабине мобильных энергетических средств является важным фактором обеспечения комфорта и продуктивности оператора. Отклонение от нормативных значений, возникающее в результате неравномерности теплопоступлений от ограждающих поверхностей кабины и наружного воздуха, может негативно повлиять на здоровье и работоспособность механизатора. Поэтому необходимо разработать адаптивный алгоритм работы климатической установки, способный прогнозировать изменения теплопоступлений в кабину и заранее корректировать холодопроизводительность.

Цель исследования. Разработка адаптивного алгоритма работы климатической установки кабины мобильных энергетических средств.

Материалы и методы. Для исследования процесса формирования микроклиматических условий в кабине мобильных энергетических средств, в том числе зависимости изменения температуры в кабине трактора, применялся метод теоретического анализа формирования теплового баланса. Применяемый экспериментальный метод включал в себя проведение измерений температуры в кабине трактора Т-150К. Прогнозирование осуществлялось методом экспоненциального сглаживания.

Результаты исследования. Разработан адаптивный алгоритм работы климатической установки в кабине мобильных энергетических средств. Получено уравнение для

© Савельев А. П., Джабборов Н. И., Петров С. А., 2026

Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

прогнозирования температуры воздуха и холодопроизводительности климатической установки. Адаптивный алгоритм теоретически обоснован и проверен на практике. **Обсуждение и заключение.** Адаптивный алгоритм позволяет прогнозировать изменение температуры в интервале одной минуты с расхождением теоретических и экспериментальных значений – 2 %. При прогнозировании изменения холодопроизводительности климатической установки расхождение составляет 5 %. Экспериментальная проверка, проведенная на тракторе Т-150К, показала низкую погрешность прогнозирования, что позволяет применять адаптивный алгоритм для работы климатических установок.

Ключевые слова: мобильное энергетическое средство, микроклиматические условия в кабинах МЭС, метод экспоненциального сглаживания, прогнозирование температуры воздуха, прогнозирование холодопроизводительности климатической установки

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Савельев А.П., Джабборов Н.И., Петров С.А. Адаптивное управление микроклиматом в кабине мобильного энергетического средства на основе прогнозирования методом экспоненциального сглаживания. *Инженерные технологии и системы.* 2026;36(1):140–157. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.036.202601.140-157>

Adaptive Control of the Microclimate in the Cabin of a Mobile Energy Vehicle Based on Forecasting by Exponential Smoothing

A. P. Savelyev^a, N. I. Jabborov^b, S. A. Petrov^c✉

^a National Research Mordovia State University, Saransk, Russian Federation, <https://ror.org/0262qgk29>

^b Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM, St. Petersburg, Russian Federation, <https://ror.org/05fhdzx69>

^c Tver State Agricultural Academy, Tver, Russian Federation, <https://ror.org/0211wgq19>

✉ petrovmolokovo@yandex.ru

Abstract

Introduction. Controlling microclimates in the cabin of mobile energy vehicles is an important factor for ensuring operator comfort and productivity. Failure to conform to the microclimate standard values, resulting from uneven heat input from the cab enclosing surfaces and outside can negatively impact the operator health and performance. Therefore, it is necessary to develop an adaptive algorithm of climate control system operation for forecasting the changes in heat input into the cabin and preadjusting cooling capacity. **Aim of the Study.** The study is aimed at developing an adaptive algorithm for the climate control system operation in the cabins of mobile energy vehicles.

Materials and Methods. The theoretical analysis of heat balance formation was used to study the creating process of microclimate conditions in the cabins of mobile energy vehicles, including the dependence of temperature changes in the tractor cabin. There was also used an experimental method involved temperature measurements in the cabin of a T-150K tractor. The exponential smoothing method was used as a forecasting method in the cabins of mobile energy vehicles.

Results. As a result of the study, an adaptive algorithm for climate control system has been developed. There has been found an equation for forecasting the air temperature and cooling capacity of a climate control system. An adaptive algorithm for the operation of a climate control system using the exponential smoothing method has been theoretically substantiated and tested in practice.

Discussion and Conclusion. The developed adaptive algorithm makes it possible to predict temperature changes in the range of one minute, while the discrepancy between theoretical and experimental values is 2%. When forecasting changes in the cooling capacity of the climate control system, the discrepancy between theoretical and experimental values was 5%. The theoretical basis of the algorithm includes a heat balance equation using the exponential smoothing method to forecast cabin air temperature. An experimental test carried out in the T-150K tractor showed a low prediction error that allows the use of an adaptive algorithm for the operation of climate control systems.

Keywords: mobile energy facility, microclimatic conditions in MEV cabins, exponential smoothing method, air temperature forecasting, forecasting the cooling capacity of a climate control system

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

For citation: Savelyev A.P., Jabborov N.I., Petrov S.A. Adaptive Control of the Microclimate in the Cabin of a Mobile Energy Vehicle Based on Forecasting by Exponential Smoothing. *Engineering Technologies and Systems*. 2026;36(1):140–157. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.036.202601.140-157>

ВВЕДЕНИЕ

Микроклиматические условия в кабине мобильных энергетических средств (МЭС) играют ключевую роль в обеспечении комфорта и продуктивности работы оператора. Их оптимальные параметры в кабинах устанавливаются нормативной документацией¹. Несмотря на наличие современных климатических установок, многие МЭС сталкиваются с различными проблемами в обеспечении нормативных микроклиматических условий в кабине, что негативно сказывается на здоровье и работоспособности оператора [1]. Так при температуре выше +24...+25 °С работоспособность начинает снижаться². Повышение температуры с +26 до +29 °С приводит к снижению производительности труда примерно на 13 %³, а при +33 °С снижение может достигать 35 % [2–4]. В то же время поддержание температуры в диапазоне +20...+24 °С может повысить производительность примерно на 7 % [5–7]. Таким образом, поддержание оптимальных микроклиматических условий на рабочих местах необходимо для обеспечения высокой производительности и сохранения здоровья работников. Основным

¹ Об утверждении методики проведения специальной оценки условий труда, классификатора вредных и (или) опасных производственных факторов, формы отчета о проведении специальной оценки условий труда и инструкции по ее заполнению: Приказ Министерства труда и социальной защиты РФ от 21 ноября 2023 №817н [Электронный ресурс]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202311300048> (дата обращения: 22.06.2025); Петров С.А., Никифоров М.В., Петрова А.А. Требования к микроклиматическим условиям труда в кабинах транспортно-технологических машин. В: Инновационные технологии: опыт, проблемы, перспективы развития: сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф. Тверь: Тверская государственная сельскохозяйственная академия; 2024. С. 202–205. <https://elibrary.ru/brtrqs>

² Gagge A.P., Stolwijk J.A.J., Nishi Y. An Effective Temperature Scale Based on a Simple Model of Human Physiological Regulatory Response. *ASHRAE Transact.* 1971;(77):247–262.

³ Fanger P.O. Thermal comfort; Analysis and Application in Environmental Engineering. Copenhagen: Danish Technical Press; 1970. 252 p.

фактором, влияющим на микроклиматические условия в кабине, являются теплопоступления. Теплопоступления в кабину МЭС – это количество теплоты, которое поступает из внешней среды. Они могут быть обусловлены разными факторами: солнечная радиация, теплопередача через прозрачные и непрозрачные ограждающие конструкции, тепловыделения от двигателя, трансмиссии, гидросистемы, электрооборудование, человек⁴. Источники теплопоступлений разнообразны. Тепло поступает в кабину за счет солнечной радиации, которая зависит от ориентации окон по сторонам света, времени суток и географического положения. Например, в теплый период года кабины с большой поверхностью остекления испытывают повышенный теплоприток за счет солнечной инсоляции. Тепло может поступать через теплопередачу – этот процесс зависит от разницы между температурой снаружи и внутри кабины, а также от характеристик ограждающих конструкций [7–9]. В течение рабочей смены теплопоступления неравномерны⁵, что обусловлено ориентацией кабины в пространстве, интенсивностью солнечной радиации, меняющейся в течение дня, конструкцией кабины МЭС, внешними климатическими факторами [10]. Неравномерность теплопоступлений от ограждающих поверхностей кабины и наружного воздуха требует разработки адаптивного алгоритма работы климатической установки, способного прогнозировать изменения теплопоступлений в кабину и заранее корректировать холодопроизводительность. При исследовании температурных условий в кабинах современных тракторов было выявлено их несоответствие оптимальным значениям, а также установлено, что алгоритм работы климатической установки неспособен быстро реагировать на изменение температурных условий. Для того чтобы обеспечить соответствующие температурные условия следует ввести интервальный контроль изменения температуры, по результатам которого будет устанавливаться необходимая холодопроизводительности климатической установки.

Целью исследования является создание и верификация алгоритма адаптивного управления климат-контролем кабины МЭС, позволяющего компенсировать неравномерность теплопоступлений за счет прогнозной корректировки холодопроизводительности на основе метода экспоненциального сглаживания.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Требования к микроклиматическим условиям в кабинах МЭС, обеспечивающие безопасность и комфортные условия труда оператора, регламентируются соответствующими нормативными документами, согласно которым оптимальная температура воздуха на рабочем месте составляет +18...+24 °С⁶, относительная

⁴ Панов Ю.А., Петров С.А. Влияние современных климатических установок транспортно-технологических машин на производительность и безопасность труда операторов. В: Повышение управленческого, экономического, социального, инновационно-технологического и технического потенциала предприятий и отраслей АПК: сб. научных трудов по материалам Междунар. науч.-практ. конф. Тверь: Изд-во Тверской ГСХА; 2017. С. 144–146.

⁵ Михайлов М.В., Гусева С.В. Микроклимат в кабинах мобильных машин. М.: Машиностроение; 1977. 230 с.

⁶ СанПиН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания: Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 28 января 2021 № 2 [Электронный ресурс]. URL: <https://base.garant.ru/400274954/> (дата обращения: 22.06.2025).

влажность – 40–60 %⁷, скорость воздуха – не более 0,2 м/с⁸ [10; 11]. По данным Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека⁹ и Федеральной службы государственной статистики¹⁰ от 60 до 300 тыс. операторов МЭС нуждаются в улучшении условий труда. Вопросам улучшения условий труда за счет нормализации параметров микроклимата на рабочих местах посвящены исследования А. М. Кормина, М. В. Михайлова, В. И. Слепцова, А. В. Деревягина, А. В. Власова, М. А. Журавца, Ю. И. Аверьянова, В. В. Масленского, Y. Xie, H. Yin и др.

А. М. Кормин предложил нормализовать микроклимат в кабинах через совершенствование теплозащитных свойств, внедрение ограждений, вентилируемых прослоек и водоиспарительного охладителя¹¹. Обосновал способ теплозащиты путем экранирования ограждений и разработал жалюзи для окон, снижающие радиационную нагрузку. Определил эффект от специальных стекол и разработал алгоритмы расчета микроклимата¹². В. И. Слепцов разработал методику определения температурного режима на основе теплового баланса и предложил регулировать тепловой режим с помощью полупроводниковых термомодулей¹³. Ученым из Саратовского аграрного университета разработана и внедрена конструктивно-технологическая схема устройства для очистки вентиляции кабины и воздуха от пыли¹⁴. Разработана модель формирования микроклимата, на основании которой предложена сферическая форма кабины, значительно уменьшающая тепловой поток¹⁵. В свою очередь, В. В. Масленский предложил модель теплового излучения для кабин, учитывающую геометрию, излучение, конвекцию и теплопроводность¹⁶. Существует аналитический способ оценки тепловой нагрузки на

⁷ ГОСТ 12.1.005-88. Система стандартов безопасности труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200003608> (дата обращения: 15.06.2025).

⁸ Об утверждении методики проведения специальной оценки условий труда, классификатора вредных и (или) опасных производственных факторов, формы отчета о проведении специальной оценки условий труда и инструкции по ее заполнению.

⁹ О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2023 году: Государственный доклад. М.: 2024. 364 с. URL: <https://base.garant.ru/411027780/> (дата обращения: 18.06.2025).

¹⁰ Наличие техники, энергетических мощностей в сельскохозяйственных организациях Российской Федерации в 2023 году. М.: Федеральная служба государственной статистики (Росстат). Главный межрегиональный центр; 2024. URL: <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13277> (дата обращения: 24.06.2025).

¹¹ Кормин А.М. Улучшение условий труда механизаторов путем разработки методов оценки и способов совершенствования теплозащитных свойств кабин: дисс. ... канд. техн. наук. Орел; 2005. 158 с.

¹² Михайлов М.В. Улучшение условий и охраны труда операторов сельскохозяйственных машин с обоснованием методов выбора параметров микроклимата в кабинах и средств его обеспечения: дисс. ... д-р. техн. наук. М.; 1991. 315 с.

¹³ Слепцов В.И. Обоснование и разработка системы нормализации микроклимата кабин при обслуживании горнотранспортных машин на карьерах Севера: дисс. ... д-р. техн. наук. М.; 2002. 252 с.

¹⁴ Деревягин А.В. Разработка инженерных методов и технических средств обеспечения экологической безопасности в сельскохозяйственном производстве на примере зерноуборочного комбайна СК-5М «Нива»: дисс. ... канд. тех. наук. Саратов; 2005. 186 с.

¹⁵ Власов А.В. Улучшение условий труда операторов подъемно-транспортных машин при строительстве объектов АПК совершенствованием конструктивных особенностей кабин: дисс. ... канд. техн. наук. Ярославль; 2007. 213 с.

¹⁶ Масленский В.В. Улучшение условий труда операторов технологических и мобильных машин в условиях нагревающего микроклимата: дисс. ... канд. техн. наук. Ростов-на-Дону; 2021. 133 с.

оператора и конструкцию водоиспарительного охладителя с высоким холодильным коэффициентом¹⁷. Ю. И. Аверьяновым предложен интегральный критерий комфортности микроклимата и обоснована необходимость применения локальных терморегулирующих устройств¹⁸.

Зарубежными учеными создана динамическая тепловая модель системы кондиционирования воздуха (АС) автомобиля, учитывающая влияние скорости транспортного средства и внешних условий на теплообмен с салоном. Предложена и применена стратегия интеллектуального прогнозного управления (ИМРС), включающая модуль скорости автомобиля и адаптацию под тепловой комфорт пассажиров [12]. Разработана интегрированная модель на базе программ ANSYS Simplorer и ANSYS Fluent для совместного моделирования работы ECS и температурного режима салона, а также внедрения ПИД-регулятора для динамического управления температурой подаваемого воздуха с поддержанием стабильности в пределах $\pm 0,6$ К от заданной [13].

Существующие исследования предлагают разрозненные решения (теплозащита, охладители, фильтры) или специализированные модели. Однако для достижения гарантированного комфорта в динамически меняющихся условиях недостаточно улучшать отдельные компоненты. Требуется система, способная координировать их работу, выбирая оптимальный режим в каждый момент времени. Совершенствование средств нормализации микроклимата достигает предела своей эффективности без адекватной системы управления. Важной задачей становится разработка и внедрение адаптивных алгоритмов, способных получать данные от различных датчиков, прогнозировать тепловую нагрузку и динамично управлять всеми элементами климатической системы для поддержания заданного комфорта при минимальных энергозатратах. Это позволит создать оптимальные микроклиматические условия, что в конечном итоге будет способствовать повышению эффективности работы и сохранению здоровья работников сельского хозяйства.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве объекта исследования был принят процесс формирования микроклиматических условий в кабине МЭС, предмет исследования – зависимость изменения температуры в кабине МЭС.

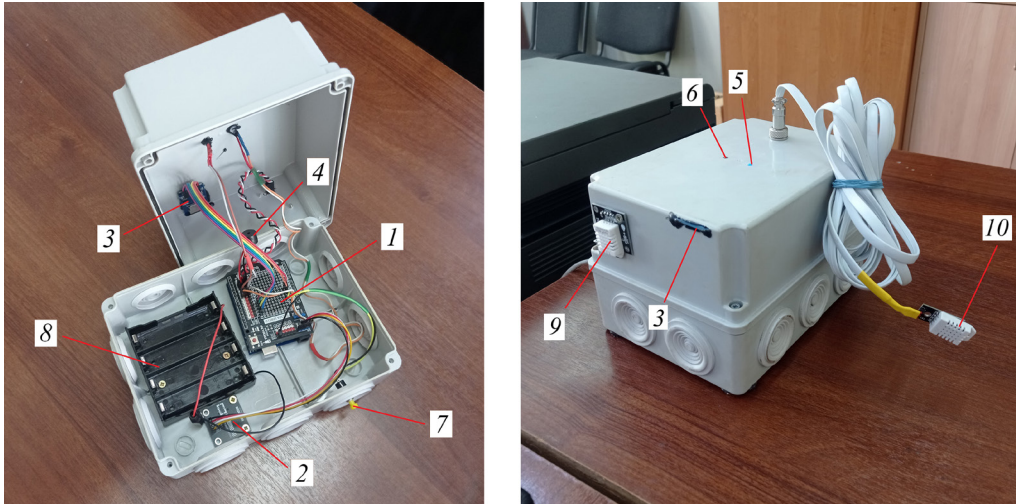
С целью подтверждения теоретических предпосылок возможности использованного разрабатываемого адаптивного алгоритма была создана экспериментальная установка и проведены исследования.

Экспериментальная установка состояла из измерительного устройства, расположенного в кабине трактора Т-150К (рис. 1). Оно представляет собой размещенную в прямоугольном корпусе плату 1 на основе микроконтроллера ATmega 328, часы реального времени 2 на базе микросхемы DS1307z, SPI адаптер 3 для карт MicroSD, пьезодинамик 4, два сигнальных светодиода 5, 6, кнопку перезагрузки 7

¹⁷ Журавец М.А. Разработка экологически безопасной системы охлаждения воздуха в кабинах лесных машин: дисс. ... канд. тех. наук. Воронеж; 2004. 179 с.

¹⁸ Аверьянов Ю.И. Улучшение условий труда операторов мобильных сельскохозяйственных машин применением локального терморегулирующего устройства: дисс. ... канд. техн. наук. Челябинск; 2000. 197 с.

и аккумуляторный блок 8. За короб вынесен внутренний датчик DHT22 для измерения температуры и относительной влажности в кабине 9, а также внешний датчик DHT22, выносимый за пределы кабины для измерения температуры и относительной влажности снаружи 10.



Р и с. 1. Измерительное устройство: 1 – плата на основе микроконтроллера ATmega 328; 2 – часы реального времени на базе микросхемы DS1307z; 3 – SPI адаптер для карт MicroSD; 4 – пьезодинамик; 5, 6 – сигнальный светодиод; 7 – кнопка перезагрузки; 8 – аккумуляторный блок; 9 – датчик DHT22 для измерения температуры и относительной влажности в кабине; 10 – внешний датчик DHT22 для измерения температуры и относительной влажности снаружи кабины

Fig. 1. Measuring device: 1 – ATmega 328 microcontroller board; 2 – real-time clock based on DS1307z chip; 3 – SPI adapter for microSD cards; 4 – piezodynamics; 5, 6 – signal LED; 7 – reset button; 8 – battery pack; 9 – DHT22 sensor for measuring temperature and relative humidity in the cabin; 10 – external sensor DHT22 for measuring temperature and relative humidity outside the cabin

Источник: фотографии сделаны С. А. Петровым при создании устройства в лаборатории технического сервиса Тверской ГСХА (г. Тверь, п. Сахарово, 2024).

Source: the photos were taken by S. A. Petrov when creating the device in the laboratory of technical service of the Tver State Agricultural Academy (Tver, Sakharovo settlement, 2024).

Методикой предусматривалось измерение и запись значений температуры воздуха снаружи и внутри кабины МЭС с интервалом в одну минуту (в течение рабочей смены оператора МЭС – 6 часов, в самый теплонагруженный период времени – с 11 до 17 часов). Полученные данные записывались на SD-карту, затем обрабатывались на персональном компьютере с помощью программного обеспечения. Для оценки расхождения теоретических расчетов и результатов эксперимента предусматривалось построение графиков.

Создание адаптивного алгоритма работы климатической установки опиралось на ряд теоретических предпосылок, включая уравнение теплового баланса кабины. Для эффективного управления микроклиматическими условиями в кабине МЭС необходимо учитывать соотношение между поступающим и отводимым из кабины

количеством теплоты. В летний период года основным естественным источником теплопоступления в кабины МЭС служит солнечная радиация, взаимодействующая с прозрачными и не прозрачными ограждениями. В настоящее время наиболее распространенным и эффективным способом снижения теплопоступлений остается использование систем вентиляции и кондиционирования воздуха, которые обеспечивают принудительное охлаждение воздуха в кабине. При этом количество теплоты, отводимое с помощью вентиляции и кондиционера $Q_{vnt.kl}$, в теплый период года определяли по следующей формуле:

$$Q_{vnt.kl} = Q_{kl} + Q_{vnt},$$

где Q_{kl} – количество теплоты, отводимое климатической установкой, Дж; Q_{vnt} – количество теплоты, отводимое вентиляцией, Дж.

Для определения количества теплоты, которое необходимо удалить из воздуха в кабине Q_{yd} , и понижения температуры с начальной температуры T_n до конечной температуры T_k применяли формулу [14; 15]:

$$Q_{yd} = c \cdot m \cdot (T_n - T_k),$$

где m – масса воздуха в кабине, кг; T_n – начальная температура воздуха, °С; T_k – конечная температура воздуха, °С; c – удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·°С).

Удаление количества теплоты происходит за счет вентиляции, т. е. замещением теплого воздуха более холодным, и с помощью рециркуляции – охлаждения находящегося в кабине воздуха за счет пропускания через испаритель кондиционера. Часто применяется смешанный режим (режим частичной рециркуляции) – часть воздуха берется из окружающей среды, часть из внутреннего пространства кабины.

Для нахождения необходимой холодопроизводительности климатической установки¹⁹ $Q'_{vnt.kl}$ воспользовались формулой [16; 17]:

$$Q'_{vnt.kl} = G \cdot c \cdot (T_n - T_k), \quad (1)$$

где G – массовый расход воздуха, кг/с.

Массовый расход воздуха²⁰ G нашли по следующей формуле [7]:

$$G = v \cdot A \cdot \rho,$$

где ρ – плотность воздуха, кг/м³; A – площадь поперечного сечения воздухопровода, м²; v – скорость воздушного потока, м/с.

В кабине МЭС с помощью вентиляции создавалось избыточное давление на 10–30 Па выше атмосферного²¹. Воздух из кабины выходил не только через вентиляционные окна, но и через неплотности кабины. Для того, чтобы найти затраты холодопроизводительности климатической установки на эксфильтрацию, выяснили массовый расход эксфильтрируемого воздуха²² G_{eji} :

¹⁹ Алексеев Г.Н. Общая теплотехника. М.: Высшая школа; 1980. 552 с.

²⁰ Богословский В.Н., Кокорин О.Я., Петров Л.В. Кондиционирование воздуха и холодоснабжение: учебник для вузов. М.: Стройиздат; 1985. 367 с.

²¹ Хохряков В.П. Вентиляция, отопление и обеспыливание воздуха в кабинах автомобилей. М.: Машиностроение; 1987. 150 с.

²² Лях Г.Д., Смола В.И. Кондиционирование воздуха в кабинах транспортных средств. М.: Металлургия; 1982. 128 с.

$$G_{e/i} = v_e \cdot A_{ls} \cdot \rho,$$

где v_e – скорость эксфильтрируемого воздушного потока, м/с, A_{ls} – площадь поперечного сечения неплотностей, м².

Зная разницу давлений в кабине и снаружи кабины ΔP , определили скорость эксфильтрируемого воздушного потока²³ v_e :

$$v_e = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}},$$

где ΔP – разность давлений внутри кабины и снаружи, Па.

Подставляя полученные значения в формулу (1), получили выражение для нахождения холодопроизводительности, затрачиваемой на эксфильтрацию воздуха $Q_{e/i}$ [14; 18]:

$$Q_{e/i} = G_{e/i} \cdot c \cdot (T_n - T_k),$$

Тогда общее количество теплоты $Q_{yd.o}$, которое необходимо удалить из воздуха равно:

$$Q_{yd.o} = Q_{yd} \pm Q_{e/i}.$$

В идеальных условиях $Q_{vnt.kl} = Q_{yd.o}$, однако необходимо учитывать теплопоступления от ограждений кабины $Q_{e,s}$ и их неравномерность, поэтому действительное значение $Q_{vnt.kl}$ должно быть больше $Q_{yd.o}$.

Затраты холодопроизводительности на конденсацию влаги из воздуха Q_{cn} нашли из формулы удельной теплоты парообразования и конденсации²⁴ [14]:

$$Q_{cn} = m \cdot L,$$

где m – масса влаги в воздухе, кг; L – удельная теплота парообразования или конденсации, Дж/кг.

Зная действительную холодопроизводительность климатической установки $Q_{ins.d}$ и количество теплоты от ограждающих поверхностей $Q_{e,s}$, а также количество теплоты, затраченное на конденсацию жидкости, рассчитали эффективную холодопроизводительность установки Q_{ef} , затрачиваемую на охлаждение воздуха:

$$Q_{ef} = Q_{ins.d} - Q_{e,s} - Q_{cn}.$$

Для нахождения времени t_{coo} изменения температуры воздуха с начальной T_n до конечной T_k применили следующую формулу:

$$t_{coo} = \frac{Q_{yd.o}}{Q_{ef}}.$$

Время t_{coo} необходимо для снижения температуры в кабине МЭС до уровня соответствующего нормативным показателям. Далее эффективная

²³ Левцев А.П., Лысяков А.И. Расчет пароконденсаторных холодильных установок: учеб. пособие. Саранск: Изд-во Мордовского ун-та; 2014. 100 с.

²⁴ Ефимов А.Ю., Агеев В.А., Полковников Н.Ф. Расчет системы воздухообеспечения и систем вентиляции промышленных предприятий: учеб. пособие. Саранск: Изд-во Мордовского ун-та; 2009. 56 с.

холодопроизводительность тратилась на поддержание нормативных температурных условий, т. е. на ограничение теплопоступлений от ограждающих конструкций. Однако неравномерность теплопоступлений поверхностей кабины и наружного воздуха требовала такого алгоритма работы климатической установки, который способен прогнозировать их изменения и своевременно корректировать холодопроизводительность.

Для определения текущей холодопроизводительности Q_d климатической установки кабины МЭС в данный момент времени при теоретических расчетах использовали формулу:

$$Q_d = G \cdot c \cdot (T_{a.nar2} - T_{a.vn2}), \quad (2)$$

где G – массовый расход воздуха через испаритель климатической установки, кг/час; c – удельная теплоемкость воздуха, кДж/(кг·°C); $T_{a.nar2}$ – текущее значение температуры наружного воздуха, °C; $T_{a.vn2}$ – текущее значение температуры воздуха в кабине, °C.

Как видим из формулы (2) для определения холодопроизводительности климатической установки необходимо знать разность температур наружного воздуха $T_{a.nar2}$ и воздуха в кабине $T_{a.vn2}$.

Для расчета прогнозируемой холодопроизводительности Q_p заменили температуру воздуха в кабине $T_{a.vn2}$ на прогнозируемое значение температуры T_p :

$$Q_p = G \cdot c \cdot (T_{a.nar2} - T_p). \quad (3)$$

Для прогнозирования температуры воздуха в кабине трактора T_p воспользовались методом экспоненциального сглаживания. Данный метод базируется на принципе различной весомости исторических данных, где более новым измерениям присваивается повышенный коэффициент значимости, а вес устаревающих данных снижается экспоненциально. Формула для расчета прогнозируемой температуры T_p воздуха в кабине выглядит следующим образом:

$$T_p = 0,9 \cdot T_{a.vn2} + 0,1 \cdot T_{a.vn1}, \quad (4)$$

где $T_{a.vn1}$ – предыдущее значение температуры воздуха в кабине трактора, °C; 0,9 и 0,1 – соответственно вес текущего и прошлого значения температуры.

Как показала практика, оптимальный временной интервал для наиболее точного прогнозирования температуры T_p составляет 1 минуту. Учитывая тот факт, что прогнозирование наружной температуры $T_{a.nar.i}$ в краткосрочном периоде (1 минута) нецелесообразно из-за ее большой инертности, то для расчета прогнозируемой холодопроизводительности Q_p воспользовались предыдущим значением наружной температуры $T_{a.nar1}$. Объединяя формулы (3) и (4), получили:

$$Q_p = G \cdot c \cdot (T_{a.vn1} \pm \sigma_{a.nar} - (0,9 \cdot T_{a.vn2} + 0,1 \cdot T_{a.vn1})), \quad (5)$$

где $T_{a.nar1}$ – предыдущее значение температуры наружного воздуха, °C, $\sigma_{a.nar}$ – отклонение значения температуры наружного воздуха, °C.

Прогнозируемая холодопроизводительность Q_p учитывала тепловое воздействие не только ограждающих конструкций кабины, но и воздействие эксфильтрации. Первые две минуты работы климатической установки, ее

холодопроизводительность была максимальная. Это необходимо для того, чтобы снизить температуру воздуха до нормативных параметров. Затем климатическая установка начала работать по алгоритму, представленному формулой (5).

Произвели теоретический расчет прогнозируемой температуры T_p и холодопроизводительности Q_p согласно формулам (4) и (5) и исходным данным, представленными в таблице.

Т а б л и ц а
T a b l e

Исходные данные для расчета
Initial data for calculation

Текущее значение температуры воздуха в кабине $T_{a.vn2}$, °C / Current value of air temperature in the cabin $T_{a.vn2}$, °C	Предыдущее значение температуры воздуха в кабине трактора $T_{a.vn1}$, °C / Previous value of air temperature in the tractor cabin $T_{a.vn1}$, °C	Предыдущее значение температуры наружного воздуха $T_{a.vn1}$, °C / Previous value of outside air temperature $T_{a.vn1}$, °C	Отклонение значения температуры наружного воздуха $\sigma_{a.nar}$, °C / Deviation of the outside air temperature value $\sigma_{a.nar}$, °C	Удельная теплоемкость воздуха c , кДж/(кг·°C) / Specific heat capacity of air c , kJ/(kg·°C)	Массовый расход воздуха через испаритель климатической установки G , кг/час / Air mass flow through the evaporator of climate control system G , kg/h
28,58	28,7	30,6	0,1	1005	0,0313

Полученные данные аппроксимированы с помощью интерполяционного полинома Лагранжа и представлены в виде следующих математических моделей:

– для прогнозируемой температуры T_p :

$$y = -2 \cdot 10^{-8} \cdot x^4 + 2 \cdot 10^{-5} \cdot x^3 - 0,0038 \cdot x^2 + 0,3094 \cdot x + 28,395$$

– для прогнозируемой холодопроизводительности Q_p :

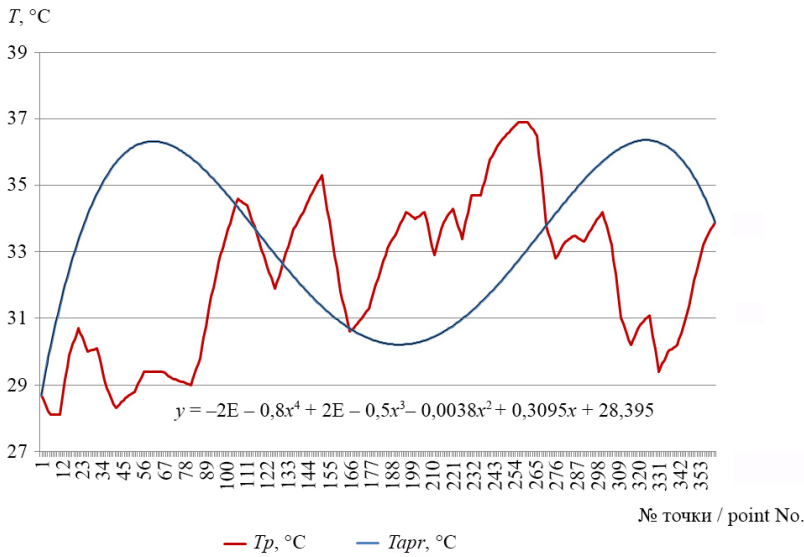
$$y = -4 \cdot 10^{-7} \cdot x^4 + 0,0003 \cdot x^3 - 0,666 \cdot x^2 + 4,8105 \cdot x + 72,591$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По полученным данным построены графики прогнозируемой температуры T_p и холодопроизводительности Q_p , а так же аппроксимированных значений (рис. 2, 3).

С помощью аппроксимации описали изменение температуры и холодопроизводительности полиномом меньшей степени с приемлемой точностью.

Для оценки расхождения прогнозируемых и экспериментальных данных температуры и холодопроизводительности в кабине МЭС провели сравнительный анализ. Для этого рассчитали прогнозируемые значения температуры T_p воздуха и холодопроизводительности Q_p в кабине, полученные по формулам (4) и (5), и сравнили их с экспериментально полученными значениями температуры $T_{a.vn}$ воздуха и холодопроизводительности Q_d в кабине МЭС. Результаты анализа представлены на рисунках 4 и 5, для наглядности на рисунках указано 60 измерений из 360.

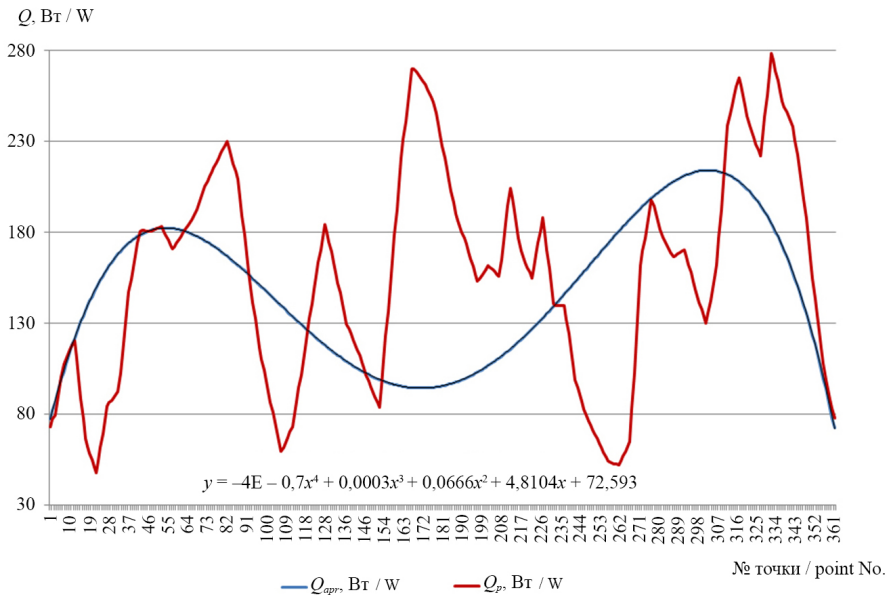


Р и с. 2. Графики изменения прогнозируемых T_p и аппроксимированных T_{apr} значений температуры

F i g. 2. Graphs of changes in forecasted T_p and approximated T_{apr} temperature values

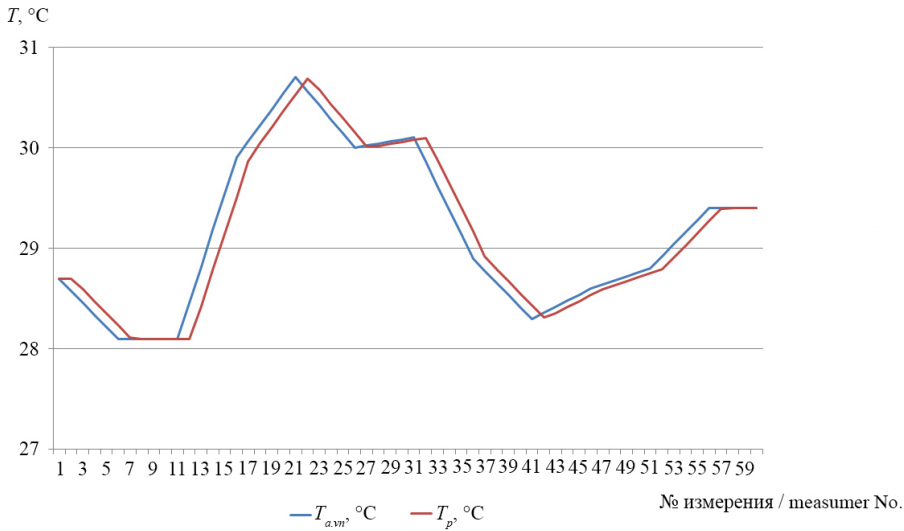
Источник: графики для рисунков 2–5 составлены авторами статьи в программе *Microsoft Excel*.

Source: the graphs for figures 2–5 were compiled by the authors of the article in the program *Microsoft Excel*.



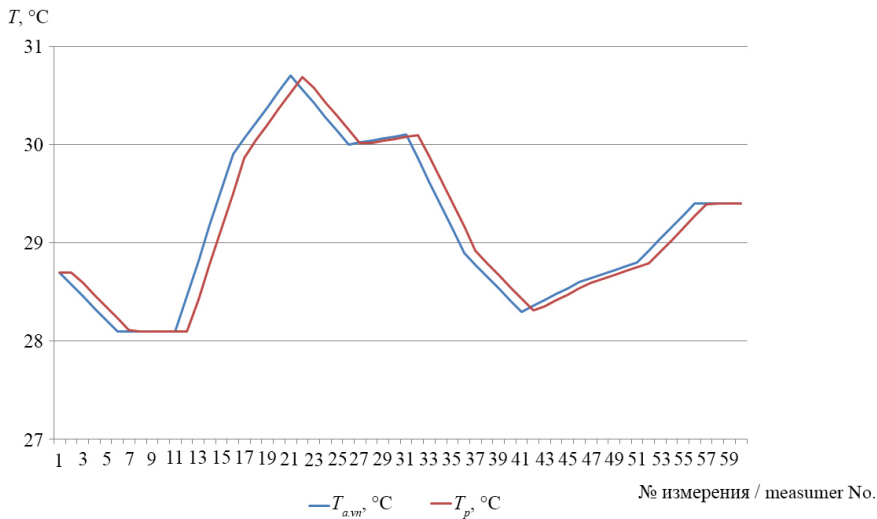
Р и с. 3. Графики изменения прогнозируемых Q_p и аппроксимированных Q_{apr} значений холодопроизводительности

F i g. 3. Graphs of changes in the forecasted Q_p and approximated Q_{apr} values of cooling capacity



Р и с. 4. Графики прогнозируемых значений температуры T_p и экспериментально полученных значений температуры T_{avn} .

Fig. 4. Graphs of forecasted temperature values T_p and experimentally obtained temperature values T_{avn} .



Р и с. 5. Графики прогнозируемых значений холодопроизводительности Q_p и текущих значений холодопроизводительности Q_d .

Fig. 5. Graphs of forecasted cooling capacity values Q_p and current cooling capacity values Q_d .

Расхождение экспериментальных и прогнозируемых значений температур составила 2 %. На графике (рис. 4) видно, что кривая расчетных значений полностью повторяет кривую истинных значений. Расхождение текущих

и прогнозируемых значений холодопроизводительности составила 5 %, кривая холодопроизводительности по расчетным значениям несущественно отклоняется от кривой холодопроизводительности по истинным значениям и повторяет тенденцию ее изменения (рис. 5).

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты данного исследования позволяют сделать вывод о том, что цель работы была достигнута. В основу адаптивного алгоритма работы климатической установки кабины МЭС положен метод экспоненциального сглаживания, который продемонстрировал высокую эффективность для краткосрочного (одноминутного) прогнозирования температуры воздуха в кабине и требуемой холодопроизводительности системы. Интерпретация полученных данных (рис. 4, 5) показывает, что расхождение между прогнозируемыми и экспериментальными значениями температуры составляет всего 2 %, а для холодопроизводительности – 5 %. Такая точность свидетельствует о том, что алгоритм адекватно отражает динамику тепловых процессов в кабине трактора Т-150К и может быть положен в основу системы управления климатической установкой различных МЭС.

Как и в работах зарубежных коллег, ключевой идеей является прогнозирование управления микроклиматом для повышения комфорта и энергоэффективности. Однако, в отличие от сложных интегрированных моделей, требующих значительных вычислительных ресурсов, представленный алгоритм предлагает прагматичное и вычислительно простое решение, основанное на модификации классического уравнения теплового баланса с использованием доступного метода экспоненциального сглаживания. В отличие от исследований, направленных на модернизацию конструктивных элементов кабины, данный алгоритм фокусируется на оптимизации управления существующей системой, что может быть реализовано с минимальными аппаратными доработками.

К сильным сторонам исследования можно отнести простоту реализации алгоритма и высокую точность прогноза. К недостаткам исследования относится то, что алгоритм в первую очередь оценивает температуру в кабине, влияние других факторов оценивается через уравнение теплового баланса.

Разработанный алгоритм имеет практическую ценность для сельскохозяйственной и транспортной отрасли, его внедрение позволит автоматически поддерживать микроклимат в кабине МЭС в оптимальном диапазоне, повышая производительность и безопасность труда оператора. Благодаря простоте интеграции в системы управления, данный алгоритм может быть адаптирован для использования на широком спектре мобильных энергетических средств.

Перспективы дальнейших исследований заключаются в расширении модели за счет учета влажности и скорости воздуха для более точной оценки микроклимата. Важным шагом станет включение алгоритма в контур системы управления климатической установкой, а также в общий контур интеллектуальной системы управления агрегатом. Это позволит создать комплексную систему, оптимизирующую как условия труда оператора, так и общую энергоэффективность агрегата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ворохобин А.В., Журавец И.Б., Манойлина С.З., Золотых Е.Д. Термическая стабилизация микроклимата в кабине сельскохозяйственного мобильного энергетического средства. *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*. 2021;14(3):64–69. https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2021_3_64
2. Shirokov Y., Kovrigo O., Ryabchikova V. Influence of Working Conditions in Agricultural Enterprises on Fatigue and Labor Productivity. In: E3S Web of Conferences. Rostov-on-Don. 2021. Article no. 12024. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202127312024>
3. Glemba K.V., Averianov Y.I. Substantiation of Parameters and Operation Modes of Device for Thermal Comfort of a Mobile Machine Operator. In: International Conference on Industrial Engineering. Chelyabinsk. 2015. P. 542–548. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.055>
4. Баланов И.А., Булыгин Ю.И., Ашихмин Д.В., Гуменюк А.С., Финоченко Т.А. Статистический анализ параметров микроклимата в кабинах путевых машин. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2023;(9):111–118. URL: <https://tidings.tsu.tula.ru/tidings/index.php?id=technical&lang=ru&year=1> (дата обращения: 15.06.2025).
5. Marchetti E., Capone P., Freda D. Climate Change Impact on Microclimate of Work Environment Related to Occupational Health and Productivity. *Annali dell Istituto Superiore di Sanita*. 2016;52(3):338–342. https://doi.org/10.4415/ANN_16_03_05
6. Dasgupta S., Maanen N., Gosling P.S.N., Piontek F., Otto C., Schleussner C.-F. Effects of Climate Change on Combined Labour Productivity and Supply: an Empirical, Multi-Model Study. *The Lancet Planetary Health*. 2021;5(7):e455–e465. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(21\)00170-4](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(21)00170-4)
7. Zewdie R., Kic P. Substantial Factors Influencing Drivers' Comfort in Transportation. *Agronomy Research*. 2017;15(5):2236–2246. <https://doi.org/10.15159/AR.17.037>
8. Масленский В.В., Булыгин Ю.И. Улучшение условий труда механизаторов-комбайнеров при воздействии интенсивного солнечного излучения. *Вестник аграрной науки Дона*. 2024;17(3):62–71. https://doi.org/10.55618/20756704_2024_17_3_62-71
9. Wu J., Jiang F., Song H., Liu C., Lu B. Analysis and Validation of Transient Thermal Model for Automobile Cabin. *Applied Thermal Engineering*. 2017;(122):91–102. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.03.084>
10. Аверьянов Ю.И., Глемба К.В., Гриценко А.В. Повышение комфортного состояния производственной среды наземных транспортно-технологических машин оптимизацией температурного энергодобавления микроклимата. *АПК России*. 2020;27(1):45–59. URL: <https://rusapk.sursau.ru/archive/1075/> (дата обращения: 04.04.2025).
11. Масленский В.В., Булыгин Ю.И. Конечный-элементный анализ параметров микроклимата в кабине металлургического крана. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2021;(1):10–20. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2021-1-10-20>
12. Xie Y., Liu Z., Li K., Liu J., Zhang Y., Dan D. и др. An Improved Intelligent Model Predictive Controller for Cooling System of Electric Vehicle. *Applied Thermal Engineering*. 2021;(182). Article no. 116084. <http://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116084>
13. Lan F., Chen H., Chen J., Li W. Effect of Urban Microclimates on Dynamic Thermal Characteristics of a Vehicle Cabin. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2023;(49). Article no. 103162. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103162>
14. Yin H., Shen X., Huang Y., Feng Z., Long Z., Duan R. и др. Modeling Dynamic Responses of Aircraft Environmental Control Systems by Coupling with Cabin Thermal Environment Simulations. *Building Simulation*. 2016;(9):459–468. <https://doi.org/10.1007/s12273-016-0278-3>
15. Булыгин Ю.И., Щекина Е.В., Масленский В.В. Разработка элементов системы нормализации микроклимата в кабине зерноуборочного комбайна tozum. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2019;(2):2–12. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2019-2-2-12>
16. Месхи Б.Ч., Булыгин Ю.И., Масленский В.В., Лоскутникова И.Н. Оценка терморрадиационного режима рабочего места крановщика в целях обоснованного выбора климатической системы

- кабины металлургического крана. *Безопасность труда в промышленности*. 2021;(2):7–14. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2021-2-7-14>
17. Манойлина С.З., Оробинский В.И. Повышение эффективности кондиционирования воздуха в кабине транспортного средств. *Наука в центральной России*. 2024;(4):17–30. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-4-17-30>
18. Zhang Y., Li Z., Liu S., Wang G., Chang H. A Study of Passenger Car Cabin Pre-Ventilation Under the Sun. *Energies*. 2023;16(20):7154. <https://doi.org/10.3390/en16207154>

REFERENCES

1. Vorokhobin A.V., Zhuravets I.B., Manolina S.Z., Zolotykh E.D. Thermal Stabilization of the Microclimate in the Cabin of Mobile Energy Machinery Used in Agriculture. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2021;14(3):64–69. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2021_3_64
2. Shirokov Y., Kovrigo O., Ryabchikova V. Influence of Working Conditions in Agricultural Enterprises on Fatigue and Labor Productivity. In: E3S Web of Conferences. Rostov-on-Don. 2021. Article no. 12024. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202127312024>
3. Glemba K.V., Averianov Y.I. Substantiation of Parameters and Operation Modes of Device for Thermal Comfort of a Mobile Machine Operator. In: International Conference on Industrial Engineering. Chelyabinsk. 2015. P. 542–548. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.055>
4. Balanov I.A., Bulygin Yu.I., Ashikhmin D.V., Gumenyuk A.S., Finochenko T.A. Statistical Analysis of Microclimate Parameters in the Cabins of Track Machines. *Izvestiya Tula State University. Technical sciences*. 2023;(9):111–118. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://tidings.tsu.tula.ru/tidings/index.php?id=technical&lang=ru&year=1> (accessed 15.06.2025).
5. Marchetti E., Capone P., Freda D. Climate Change Impact on Microclimate of Work Environment Related to Occupational Health and Productivity. *Annali dell Istituto Superiore di Sanita*. 2016;52(3):338–342. https://doi.org/10.4415/ANN_16_03_05
6. Dasgupta S., Maanen N., Gosling P.S.N., Piontek F., Otto C., Schleussner C.-F. Effects of Climate Change on Combined Labour Productivity and Supply: an Empirical, Multi-Model Study. *The Lancet Planetary Health*. 2021;5(7):e455–e465. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(21\)00170-4](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(21)00170-4)
7. Zewdie R., Kic P. Substantial Factors Influencing Drivers' Comfort in Transportation. *Agronomy Research*. 2017;15(5):2236–2246. <https://doi.org/10.15159/AR.17.037>
8. Maslensky V.V., Bulygin Yu.I. Improving the Working Conditions of Combine Harvester Operators When Exposed to Intense Solar Radiation. *Vestnik Agrarnoj nauki Dona*. 2024;17(3):62–71. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.55618/20756704_2024_17_3_62-71
9. Wu J., Jiang F., Song H., Liu C., Lu B. Analysis and Validation of Transient Thermal Model for Automobile Cabin. *Applied Thermal Engineering*. 2017;(122):91–102. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.03.084>
10. Averyanov Yu.I., Glemba K.V., Gritsenko A.V. Improving the Comfortable State of the Production Environment of Ground Transportation and Technological Machines by Optimizing the Temperature Energy Balance of the Microclimate. *Agro-Industrial Complex of Russia*. 2020;27(1):45–59. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://rusapk.sursau.ru/arhive/1075/> (accessed 04.04.2025).
11. Maslenskiy V.V., Bulygin Yu.I. Finite Element Analysis of Microclimate Parameters in the Metallurgical Crane Cabin. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2021;(1):10–20. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2021-1-10-20>
12. Xie Y., Liu Z., Li K., Liu J., Zhang Y., Dan D., et al. An Improved Intelligent Model Predictive Controller for Cooling System of Electric Vehicle. *Applied Thermal Engineering*. 2021;(182). Article no. 116084. <http://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116084>
13. Lan F., Chen H., Chen J., Li W. Effect of Urban Microclimates on Dynamic Thermal Characteristics of a Vehicle Cabin. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2023;(49). Article no. 103162. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103162>

14. Yin H., Shen X., Huang Y., Feng Z., Long Z., Duan R., at al. Modeling Dynamic Responses of Aircraft Environmental Control Systems by Coupling with Cabin Thermal Environment Simulations. *Building Simulation*. 2016;(9):459–468. <https://doi.org/10.1007/s12273-016-0278-3>
15. Bulygin Yu.I., Shchekina E.V., Maslenskiy V.V. Development of Microclimate Normalization System Elements in the Cabin of Torum Grain Harvester. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2019;(2):2–12. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2019-2-2-12>
16. Meskhi B.Ch., Bulygin Yu.I., Maslenskiy V.V., Loskutnikova I.N. Assessment of the Thermal Radiation Regime of the Crane Operator Workplace for Making the Reasonable Choice of the Climate System of the Metallurgical Crane Cabin. *Occupational Safety in Industry*. 2021;(2):7–14. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2021-2-7-14>
17. Manoilina S.Z., Orobinsky V.I. Improving the Efficiency of Air Conditioning in the Vehicle Cabin. *Science in the Central Russia*. 2024;(4):17–30. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-4-17-30>
18. Zhang Y., Li Z., Liu S., Wang G., Chang H. A Study of Passenger Car Cabin Pre-Ventilation Under the Sun. *Energies*. 2023;16(20):7154. <https://doi.org/10.3390/en16207154>

Об авторах:

Савельев Анатолий Петрович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры безопасности жизнедеятельности Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0361-0827>, Scopus ID: 57220747901, Researcher ID: AAB-2078-2021, SPIN-код: 2865-2693, tbsap52@mail.ru

Джаббаров Нозим Исмоилович, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник отдела агроэкологии в растениеводстве Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (196625, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, п. Тярлево, Филътровское ш., д. 3), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8910-2625>, Researcher ID: A-7780-2019, SPIN-код: 5203-7086, nozimjon-59@mail.ru

Петров Сергей Алексеевич, доцент кафедры технической эксплуатации автомобилей Тверской государственной сельскохозяйственной академии (170904, Российская Федерация г. Тверь, ул. Маршала Василевского (Сахарово), д. 7), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4951-0645>, SPIN-код: 8160-8595, spetrov@tvgscha.ru

Вклад авторов:

А. П. Савельев – формулировка идеи исследования, целей и задач; контроль, лидерство и наставничество при планировании и проведении исследования.

Н. И. Джаббаров – контроль, лидерство и наставничество при планировании и проведении исследования.

С. А. Петров – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор данных; создание и подготовка рукописи: визуализация результатов исследования и полученных данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 04.09.2025; поступила после рецензирования 22.10.2025;
принята к публикации 28.10.2025*

About the authors:

Anatoly P. Savelyev, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of Life Safety, National Research Mordovian State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian

Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0361-0827>, Scopus ID: 57220747901, Researcher ID: AAB-2078-2021, SPIN code: 2865-2693, tbsap52@mail.ru

Nozim I. Jabborov, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Leading Researcher of the Department of Agroecology in Crop Production, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3 Filitrovskoe Shosse, Tiarlevo, St. Petersburg 196625, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8910-2625>, Researcher ID: A-7780-2019, SPIN code: 5203-7086, nozimjon-59@mail.ru

Sergey A. Petrov, Associate Professor of the Department of Technical Operation of Automobiles, Tver State Agricultural Academy (7 Marshal Vasilevsky St., (Sakharovo), Tver 170904, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4951-0645>, SPIN code: 8160-8595, spetrov@tvgsa.ru

Authors contribution:

A. P. Savelyev – formulating ideas, objectives and aims of the study; oversight and leadership responsibility for the research activity planning and execution, including mentorship external to the core team.

N. I. Jabborov – oversight and leadership responsibility for the research activity planning and execution, including mentorship external to the core team.

S. A. Petrov – conducting the study, specifically performing the experiments and collecting data; preparing the manuscript, specifically visualizing the study results and data obtained.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 04.09.2025; revised 22.10.2025; accepted 28.10.2025