

Научная статья

УДК 630.181+519.6

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-6-139-152

Оптимизация режимов работы лесопожарной машины

Е.А. Питухин, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [H-4562-2016](https://orcid.org/0000-0002-7021-2995).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7021-2995>

С.С. Рогозин[✉], преподаватель; ResearcherID: [AFS-3782-2022](https://orcid.org/0000-0002-8602-8930).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8602-8930>

Петрозаводский государственный университет, просп. Ленина, д. 33, г. Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910; eugene@petrsu.ru, prerxa@mail.ru[✉]

Поступила в редакцию 12.01.22 / Одобрена после рецензирования 08.04.22 / Принята к печати 10.04.22

Аннотация. Рассматриваются специализированные лесопожарные машины, необходимые для тушения лесных пожаров. Представлен обзор отечественной и зарубежной современной лесопожарной техники и методов борьбы с лесными пожарами. Отмечается, что общим недостатком тепловой защиты лесопожарной машины является быстрый нагрев поверхностей ограждений кабин при ликвидации пожаров в экстремальных условиях. Следовательно, проблема повышения эффективности функционирования лесопожарной машины при тушении пожаров, задачи обеспечения работоспособности, оптимизации параметров и режимов работы, разработка и создание новых огнезащитных материалов, повышение показателей эргономики кабины и безопасности условий труда оператора остаются актуальными. Приводится обоснование оптимизации параметров и режимов работы лесопожарной машины на основе заданной тактической схемы организации тушения лесного пожара. В качестве целевой функции математической задачи оптимизации принята производственная мощность, т. е. площадь, которую можно потушить при помощи лесопожарной машины. В качестве управляющих факторов рассматриваются параметры основного и вспомогательного оборудования: производительность насосов, подающих воду и водные растворы пенообразователей; вместимость водного бака; время оцениваемого периода тушения лесного пожара и огнезащитные свойства элементов конструкции лесопожарной машины, а именно температура самовоспламенения теплоизоляции ограждения кабины. Математическая задача оптимизации решается аналитическим методом. Для проведения численных расчетов и программной реализации используются методы вычислительной математики и прикладного программирования. Решение задачи позволяет рассчитать производственную мощность лесопожарной машины, определить требуемые огнезащитные свойства поверхностей ограждений кабин и предложить новые конструкционные огнезащитные материалы, рекомендовать основное и вспомогательное оборудование. Улучшение эргономических показателей кабин во время тушения пожаров повысит безопасность условий труда оператора. Эффективная работа лесопожарной машины во время борьбы с огнем способствует снижению ущерба, наносимого окружающей среде, и убытков, являющихся последствием уничтожения миллионов гектаров леса.

Ключевые слова: лесные пожары, лесопожарная машина, режимы работы, оптимизация параметров работы, экологическая безопасность

Для цитирования: Питухин Е.А., Рогозин С.С. Оптимизация режимов работы лесопожарной машины // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 6. С. 139–152. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-6-139-152>

Original article

Optimizing the Forest Firefighting Vehicle Operation Modes

Eugene A. Pitukhin, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [H-4562-2016](https://orcid.org/0000-0002-7021-2995).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7021-2995>

Stepan S. Rogozin[✉], Lecturer; ResearcherID: [AFS-3782-2022](https://orcid.org/0000-0002-8602-8930).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8602-8930>

Petrozavodsk State University, prosp. Lenina, 33, Petrozavodsk, Republic of Karelia, 185910, Russian Federation; eugene@petsu.ru, ppexa@mail.ru[✉]

Received on January 12, 2022 / Approved after reviewing on April 8, 2022 / Accepted on April 10, 2022

Abstract. The article considers specialized forest firefighting vehicles required to extinguish forest fires. An overview of modern domestic and foreign forest firefighting equipment and techniques for fighting forest fires is presented. Rapid heating of the cabin enclosure surfaces is a common weakness of the thermal shielding of a forest firefighting vehicle when extinguishing fires in extreme conditions. Therefore, the following issues remain relevant: problem of increasing the forest firefighting vehicle operation efficiency when extinguishing fires; issues of ensuring the operability and optimization of operation parameters and modes; development and creation of new fire protection materials; improving the cabin ergonomics and operator safety. The paper provides substantiation for optimizing the parameters and operation modes of a forest firefighting vehicle on the basis of the given tactical scheme of forest fire extinguishing. The objective function of the mathematical optimization problem is the production capacity, i.e. the area that can be extinguished by a forest fire vehicle. As control factors we consider following parameters of main and auxiliary equipment: capacity of pumps supplying water and foam/water mixtures; water tank capacity; estimated time of forest fire extinguishing and flame retardant properties of the forest firefighting vehicle structure elements, particularly spontaneous ignition temperature of cabin enclosure thermal insulation. The mathematical optimization problem is solved by the analytical method. Methods of computational mathematics and applied programming are used for numerical calculations and software implementation. The solution of the problem enables to calculate the production capacity of a forest firefighting vehicle, determine the required flame retardant properties of the cabin enclosure surfaces and propose new structural fire-resistant materials, recommend the main and auxiliary equipment. Improving the ergonomics of cabins during firefighting will improve the safety of the operator's working conditions. The effective operation of a forest firefighting vehicle while firefighting reduces the damage to the environment and the losses caused by the destruction of millions hectares of forest.

Keywords: forest fires, forest firefighting vehicle, operation modes, optimizing operation parameters, environmental safety

For citation: Pitukhin E.A., Rogozin S.S. Optimizing the Forest Firefighting Vehicle Operation Modes. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2022, no. 6, pp. 139–152. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-6-139-152>



Введение

В последнее время из-за потепления климата частые лесные пожары причиняют значительный ущерб окружающей среде. Очаги возгорания, возникающие на обширной территории Российской Федерации, охватывают миллионы гектаров и приносят финансовые убытки. В связи с этим проблема борьбы с огненной стихией становится все более актуальной.

Для тушения огня на больших площадях целесообразно использовать специализированные лесопожарные машины (ЛПМ). Технические решения пассивной тепловой защиты ЛПМ включают в себя защиту оператора кабины от теплового воздействия при помощи ее теплоизоляции, экранирования и специального остекления. Материалы для пассивной защиты должны характеризоваться комплексными противопожарными свойствами и одновременно высокими показателями теплоизоляции, огнестойкости и механической прочности.

В качестве активных способов теплозащиты используются методы, основанные на испарении воды, стекающей по поверхности машины или распыленной вокруг нее в виде аэрозоля. Недостатками данных методов являются трудность защиты участков кузова со сложной конфигурацией и дополнительный расход воды, необходимой для тушения пожара [4, 5].

При тушении лесного пожара последовательно осуществляются (в соответствии с Лесным кодексом РФ, № 200–ФЗ, от 04.12.2006) остановка распространения его кромки, локализация и дотушивание очагов горения, оставшихся внутри пожарища. Для борьбы с верховым огнем на больших площадях оператор ЛПМ использует ручные пожарные стволы низкого и высокого давления в режиме работы как с водой, так и с водными растворами с пенообразователями. Передним навесным толкателем и задним навесным устройством ЛПМ возводятся противопожарные минерализованные полосы, которые являются эффективным средством для предупреждения низового пожара и предотвращения его распространения на соседние территории. При этом во время тушения огня ЛПМ воспринимает повышенные тепловые нагрузки [1, 2, 4, 6, 7].

Общим недостатком существующей тепловой защиты ЛПМ является быстрый нагрев поверхностей ограждений кабин в экстремальных условиях при ликвидации пожаров. Следовательно, проблема повышения эффективности функционирования ЛПМ при тушении пожаров, задачи обеспечения работоспособности, оптимизации параметров и режимов работы ЛПМ, разработка и создание новых огнезащитных материалов, повышение показателей эргономики кабины и безопасности условий труда оператора продолжают оставаться актуальными.

Одним из производителей ЛПМ является Онежский тракторный завод, который выпускает широкую линейку гусеничных машин и на их базе пожарный трактор – «Онежец-310». Эта лесохозяйственная спецмашина предназначена для тушения лесного пожара и проведения профилактических противопожарных работ. Кроме локализации и гашения очага пожара она также может эффективно ликвидировать источник возгорания складов леса и пиломатериалов, деревянных строений в труднодоступных местностях, использоваться для прокладки противопожарных полос, заброски пожарных команд, обустройства пожарных водоемов и в качестве передвижных перекачивающих насосных станций.

Разновидностью ЛППМ, выпускаемых Онежским тракторным заводом, является гусеничный трактор ЛХТ-100А-12, который предназначен для борьбы с лесными пожарами в труднодоступных местах на основе выполнения механизированных работ: локализации очагов возгорания посредством создания заградительных полос, заливки огненной кромки пожара водой, пеной или эмульсиями.

Алтайский тракторный завод выпускает трактор ТТ-4 «Алттрак ТЛП-4М-031». Он разработан как для заливки очагов лесных пожаров жидкими огнетушащими растворами и пеной, так и для прокладки заградительных полос с целью локализации очагов возгорания посредством минерализации почвы, доставки к месту пожара средств пожаротушения.

Лесопожарный трактор ТЛП 55.5.00.000 ВЛ Великолукского завода «Лесхозмаш» борется с лесными пожарами в труднодоступных местах механизированным способом путем тушения кромки пожара водой или огнегасящими эмульсиями, локализации лесных пожаров, создания опорных заградительных полос.

Лесопожарный агрегат ЛПА-521 Научно-производственной корпорации «Уралвагонзавод» им. Ф.Э. Держинского может доставлять силы и средства к месту ведения лесопожарных работ, тушить лесные низовые пожары огнегасящими жидкостями, воздушно-механической пеной, вести профилактические управляемые выжигания и создавать заградительные минерализованные полосы.

Гусеничный пожарный трактор МТ-ЛБу-ГПМ-10 производства «Муромтепловоз» разработан для комплексных работ в труднопроходимых условиях: доставки личного состава сотрудников МЧС, патрулирования лесных территорий, тушения пожаров и проведения спасательных работ, а также подачи воды к месту возгорания от различных источников.

Пожарная гусеничная машина RAC, сделанная в Германии, сочетает в себе традиционные и современные технологии пожаротушения для борьбы с крупномасштабными пожарами на нефтяных скважинах, нефте- и газопроводах, химических заводах и в лесу. Благодаря многофункциональности трактор может быть отнесен к специальному типу большинства современных средств пожаротушения.

Известный мировой производитель, канадская фирма КМК-Кootrac, выпускает специализированную высокоскоростную машину КМС 210 FT на гусеничном ходу, спроектированную для лесного хозяйства и работы на лесных пожарах. Агрегат способен функционировать в том числе на влажных и заболоченных почвах.

Китайская компания Lannmarker (Шанхай) производит гусеничную лесную пожарную машину FFV09. Многоцелевой трактор оснащен противопожарным оборудованием, которое может использоваться в зависимости от лесной пожарной обстановки, адаптирован к различным ландшафтам и способен преодолевать водные преграды.

Перспективно создание по модульному принципу многооперационных лесных машин, которые могли бы выполнять задачи при лесохозяйственных работах, а в пожароопасный период легко переоборудоваться в машины для борьбы с лесными пожарами. К настоящему времени на международном рынке

лесных машин представлены два варианта таких противопожарных форвардеров – компании TimberPro (США) и компании Ponsse (Финляндия).

Существует литература, посвященная разбору задач по расчету и оптимизации различных параметров организации тушения пожаров [5]. Также выполнены исследования, в которых разрабатывается задача планирования движения пожарных машин при многоточечных лесных пожарах, целью таких исследований является оптимальное направление ограниченного количества пожарных машин для тушения пожаров [19]. Однако тепловое воздействие на ЛПМ в работах не учтено. Рассматриваются циклические процессы тушения пожара и заправка водой баков пожарных машин, а также анализ и сравнение стратегий планирования работы пожарных машин [20]. При этом внимание уделено задаче тушения только нефтяных пожаров.

Маршрутизация в лесах с помощью беспилотных летательных аппаратов является продолжением классической работы ЛПМ. В борьбе с лесными пожарами важны наличие водных ресурсов и сеть обслуживания. Однако этот новый подход включает ограничения, связанные с аккумулятором дрона, а также проблему компромисса между временем и стоимостью патрулирования [12, 13, 16].

Цель исследования – формулирование и решение задачи оптимизации параметров и режимов работы ЛПМ в условиях чрезвычайных ситуаций – при тушении лесных пожаров.

Для этого необходимо решить следующие задачи: построить математическую задачу оптимизации и режимов работы ЛПМ; определить целевую функцию и управляющие факторы; выполнить численный расчет, найти оптимальные параметры оборудования и режимов работы ЛПМ.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования является ЛПМ, предметом – оптимизация параметров и режимов ее работы.

Любая математическая задача оптимизации включает в себя управляющие факторы, целевую функцию, область допустимых значений и может включать дополнительные ограничения на управляющие факторы, а также различные параметры или константы [9–11, 15, 17].

Рассматривается следующий элемент тактической схемы организации тушения лесного пожара. Пожарный расчет, включающий ЛПМ, прибывает на место пожаротушения с полным баком воды или водных растворов пенообразователей и производит заливку очага пожара в непосредственной близости от кромки пожара, в результате чего на ЛПМ оказывается тепловое воздействие, которое характеризуется температурой t^{fire} , °С, на поверхности источника тепла – очага пожара.

Номинальное время заливки τ^{nom} , с, зависит от технологической эффективности единицы ЛПМ – вместимости водного бака V , л, и производительности оборудования ЛПМ – скорости подачи воды или водных растворов пенообразователей под давлением Q , л/с, на месте пожаротушения:

$$\tau^{nom}(V, Q) = \frac{V}{Q}.$$

Элементы конструкции кабины ЛПМ и другие устройства, защищающие оператора, во время тушения огня воспринимают повышенные тепловые нагрузки, вследствие чего быстро нагреваются. При этом растет пожарная опасность, что может привести к воспламенению теплоизоляционного материала, которым облицовано металлическое ограждение кабины ЛПМ изнутри [8, 18].

При постановке задачи оптимизации параметров ЛПМ, таких как вместимость бака и производительность оборудования, были проведены исследования температурных зависимостей элементов конструкции ЛПМ от параметров композиционного материала, технологии его нанесения и времени теплового воздействия в виде вычислительного эксперимента [8]. В основу компьютерного моделирования положена математическая модель – система уравнений теплопроводности, уравнений Навье–Стокса и уравнение излучения, а также начальные и граничные условия. Решение данной системы производилось численно, методом конечных объемов при помощи программного пакета OpenFOAM. В частности, построена расчетная сетка области решения, включающая часть элемента конструкции плоского ограждения кабины ЛПМ площадью 1 м², и получено поле распределения температур в зависимости от времени, прошедшего с начала теплового воздействия.

Результаты численного эксперимента позволили представить зависимость критического времени работы ЛПМ τ^{cr} , с, от достижения теплоизоляционным материалом температуры самовоспламенения t^{sf} , °С, а также от теплового воздействия в виде

$$\tau^{cr} = f(t^{sf}, t^{fire}).$$

Максимально возможное время тушения лесного пожара τ^{max} , °С, ограничивается условием:

$$\tau^{max}(V, Q) = \min\{\tau^{nom}(V, Q), \tau^{cr}\}.$$

Тепловое воздействие со стороны очага пожара характеризуется зависимостью [8, 14]:

$$t^{fire}(\tau) - t_0 = 345 \lg \left(8 \cdot \frac{\tau}{60} + 1 \right), \quad (1)$$

где t_0 – начальная температура, °С, равная температуре окружающей среды для заданного региона эксплуатации ЛПМ; τ – период, соответствующий температуре, °С, на поверхности источника тепла (очага пожара), с.

В нашем случае уравнение (1) принимает следующий вид:

$$t^{sf}(\tau^{cr}) - t_0 = 345 \lg \left(8 \cdot \frac{\tau^{cr}}{60} + 1 \right).$$

Получаем зависимость критического времени работы ЛПМ от температуры самовоспламенения теплоизоляционного материала:

$$\tau^{cr}(t^{sf}) = 60 \left(10^{\frac{t^{sf} - t_0}{345}} - 1 \right) / 8. \quad (2)$$

Обозначим это уравнение как $\tau^{cr}(t^{sf}) = f(t^{sf})$.

Для тушения лесных пожаров необходимо обеспечить интенсивность подачи воды J^{\min} , л/(м²·с) [3, 5]: 1 и 0,1...0,15 л/(м²·с) при верховом и низовом пожаре соответственно.

Обозначим $U(Q)$, м²/с, – скорость тушения кромки, или площадь пожара, которая является функцией, зависящей от подачи воды. Если ввести величину k , л/м², – объем воды, л, необходимый для тушения 1 м² площади пожара, то $U(Q) = Q/k$.

В качестве целевой функции в данной модели рассматривается производственная мощность P , м², – это площадь, которую можно потушить при помощи ЛПМ:

$$P(V, Q, \tau^{cr}) = U(Q) \min \left\{ \tau^{nom}(V, Q), \tau^{cr} \right\} = \frac{Q}{k} \min \left\{ \frac{V}{Q}, \tau^{cr} \right\} = \min \left\{ \frac{V}{k}, \frac{Q}{k} \tau^{cr} \right\}. \quad (3)$$

Данное уравнение можно представить следующим образом:

$$P(V, Q, \tau) = U(Q) \min \left\{ \tau^{nom}(V, Q), \tau \right\} = \min \left\{ \frac{V}{k}, \frac{Q}{k} \tau \right\}. \quad (3, a)$$

Очевидно, что уравнения (3) и (3, а) идентичны. Таким образом, величины τ^{cr} и τ являются равнозначными.

Результаты исследования и их обсуждение

Существуют ЛПМ с вместимостью бака $V \in \{2500, 5000 \text{ и } 7000, \text{ л}\}$ и производительностью оборудования $Q \in \{7 \text{ и } 40, \text{ л/с}\}$ [3, 5].

Отсюда получаем следующую задачу оптимизации:

$$\begin{cases} P(V, Q, \tau^{cr}) = \min \left\{ \frac{V}{k}, \frac{Q}{k} \tau^{cr} \right\} \rightarrow \max; \\ V \in \{2500, 5000, 7000\}; \\ Q \in \{7, 40\}; \\ \tau^{cr} \in [0, \infty). \end{cases}$$

Здесь τ^{cr} – управляющий фактор, а V , Q и k – фиксированные параметры.

Эта задача имеет множество решений, поэтому постановка задачи оптимизации принимает следующий вариант: предположим, что множество допустимых значений V и Q дискретно. Для каждой пары значений (V, Q) существует максимальная производственная мощность $P^{\max}(V, Q)$, вычисляемая по уравнению (3). В этом случае рассматривается задача нахождения минимально возможного времени работы ЛПМ, при котором достигается максимальная производственная мощность. Данная постановка задачи обусловлена тем, что после израсходования полного бака воды для ЛПМ требуется покинуть зону пожаротушения с целью повторной заправки бака водой. Следовательно, для ЛПМ нет необходимости выдерживать тепловое воздействие со стороны очага пожара более длительное время.

Таким образом, получаем первую математическую задачу оптимизации:

$$\left\{ \begin{array}{l} \{(V, Q, \tau^{cr}) : \tau^{cr} \rightarrow \min, P(V, Q, \tau^{cr}) = P^{\max}(V, Q)\}; \\ P(V, Q, \tau^{cr}) = \min \left\{ \frac{V}{k}, \frac{Q}{k} \tau^{cr} \right\}; \\ V \in \{2500, 5000, 7000\}; \\ Q \in \{7, 40\}; \\ \tau^{cr} \in [0, \infty). \end{array} \right. \quad (4)$$

Решение математической задачи оптимизации (4) позволяет рассчитать минимальное время $\tau^{cr} \rightarrow \min$ работы ЛПМ, при котором достигается максимальная производственная мощность для каждой пары значений (V, Q) .

С учетом уравнения (2) для минимальной температуры самовоспламенения теплоизоляционного материала ограждения кабины ЛПМ, при которой достигается максимальная производственная мощность $P(V, Q, t^{sf}) = P^{\max}(V, Q)$, получаем вторую математическую задачу оптимизации:

$$\left\{ \begin{array}{l} \{(V, Q, t^{sf}) : t^{sf} \rightarrow \min, P(V, Q, t^{sf}) = P^{\max}(V, Q)\}; \\ P(V, Q, t^{sf}) = \min \left\{ \frac{V}{k}, \frac{Q}{k} f(t^{sf}) \right\}; \\ V \in \{2500, 5000, 7000\}; \\ Q \in \{7, 40\}; \\ t^{sf} \in [0, \infty). \end{array} \right. \quad (5)$$

Здесь t^{sf} – управляющий фактор, а V, Q и k – фиксированные параметры.

Решение второй математической задачи оптимизации (5) позволяет рассчитать минимальную температуру самовоспламенения теплоизоляции $t^{sf} \rightarrow \min$, при которой достигается максимальная производственная мощность для каждой пары значений (V, Q) .

Математическая задача оптимизации (уравнения (4) и (5)) решается аналитическим методом (рис. 1, 2). В начальный момент времени принимаем температуру равной температуре окружающей среды для региона эксплуатации, Республики Карелии, $t_0 = 20$ °С [1, 3, 5]. Исходя из технических параметров работы водяных комбинированных насосов НЦПК-40/100-4/400-В1Т берем подачу воды $Q_1 = 7$ л/с и $Q_2 = 40$ л/с [1, 3, 5]. При этом параметрами вместимости бака являются значения $V_1 = 2500$ л/с; $V_2 = 5000$ л/с и $V_3 = 7000$ л/с. Средний расход воды для заливки 1 м² площади пожара зависит от интенсивности подачи воды, времени на тушение 1 м² и может меняться при изменении условий тушения пожара. Принимаем $k = 3$ л/м² [3, 5]. Данные начальные и граничные условия идентичны для первой и второй задачи оптимизации (уравнения (4) и (5)).

Первая математическая задача оптимизации (4) имеет аналитическое решение, показанное на рис. 1.

Рис. 1. Зависимость производственной мощности от времени работы ЛПМ при заданных значениях вместимости бака $V \in \{2500, 5000, 7000\}$ л и производительности оборудования: $a - 7$ л/с; $b - 40$ л/с

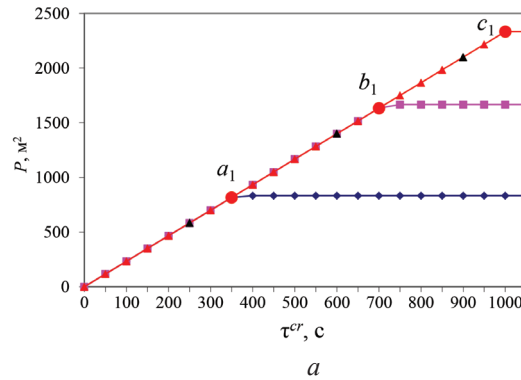
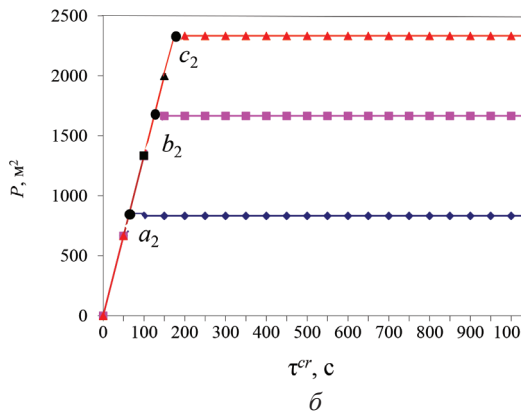


Fig. 1. Dependence of production capacity on operating time of the forest firefighting vehicle (FFV) at specified tank capacity values $V \in \{2500, 5000 \text{ and } 7000 \text{ L}\}$ and equipment performance: $a - 7$ L/s; $b - 40$ L/s



На графике рис. 1, а видно, что при увеличении времени работы ЛПМ производственная мощность возрастает линейно для производительности оборудования 7 л/с при заданных значениях вместимости бака до величины, при которой будет израсходован весь объем воды из бака, а затем перестает увеличиваться. При достижении своего максимума P становится константой. Точки a_1, b_1, c_1 принадлежат времени τ^{cr} , при котором достигается максимальная производственная мощность для каждого заданного значения вместимости бака ЛПМ.

Для решения задачи (4) найдем точку пересечения прямых: $y_1 = V/k$ и $y_2 = (V/k) \tau^{cr}$.

Получаем: $y_1 = y_2$, откуда $\tau^{cr} = V/Q$.

Решение задачи (4) для Q_1 :

$$P_1^{\max}(V, Q) = \begin{cases} P_{a_1}^{\max}(V_1, Q_1) = 833; \tau_{a_1}^{cr} = 357; \\ P_{b_1}^{\max}(V_2, Q_1) = 1667; \tau_{b_1}^{cr} = 714; \\ P_{c_1}^{\max}(V_3, Q_1) = 2333; \tau_{c_1}^{cr} = 1000. \end{cases} \quad (6)$$

График рис. 1, б показывает, что при большей производительности оборудования – 40 л/с – производственная мощность растет быстрее и также носит линейный характер. Следовательно, быстрее достигается максимальное значение P для каждого заданного значения вместимости бака ЛПМ. Точки a_2, b_2, c_2

принадлежат времени τ^{cr} , при котором производственная мощность максимальна для каждого заданного значения вместимости бака ЛПМ. При достижении максимума P становится константой.

Аналогично получаем: $\tau^{cr} = V/Q$.

Определяем решение задачи (4) для Q_2 :

$$P_2^{\max}(V, Q) = \begin{cases} P_{a_2}^{\max}(V_1, Q_2) = 833; \tau_{a_2}^{cr} = 63; \\ P_{b_2}^{\max}(V_2, Q_2) = 1667; \tau_{b_2}^{cr} = 125; \\ P_{c_2}^{\max}(V_3, Q_2) = 2333; \tau_{c_2}^{cr} = 175. \end{cases} \quad (7)$$

Уравнения (6) и (7) являются решением первой математической задачи оптимизации (4). Расчеты показывают, что при обозначенных начальных и граничных условиях в случае подачи воды со скоростью 7 л/с получены минимальные значения $\tau^{cr}(a_1) = 357$ с, $\tau^{cr}(b_1) = 714$ с и $\tau^{cr}(c_1) = 1000$ с, при которых достигаются максимальные производственные мощности $P^{\max}(a_1) = 833$ м², $P^{\max}(b_1) = 1667$ м² и $P^{\max}(c_1) = 2333$ м². При подаче воды со скоростью 40 л/с получены минимальные значения $\tau^{cr}(a_2) = 63$ с, $\tau^{cr}(b_2) = 125$ с и $\tau^{cr}(c_2) = 175$ с, при которых достигаются максимальные производственные мощности $P^{\max}(a_2) = 833$ м², $P^{\max}(b_2) = 1667$ м² и $P^{\max}(c_2) = 2333$ м².

Вторая математическая задача оптимизации (5) также решается аналитическим методом (рис. 2). Заметим, что в отличие от первой задачи (4) для решения данной задачи и построения графиков используется уравнение (2) для зависимости времени работы ЛПМ от температуры самовоспламенения теплоизоляционного материала кабины.

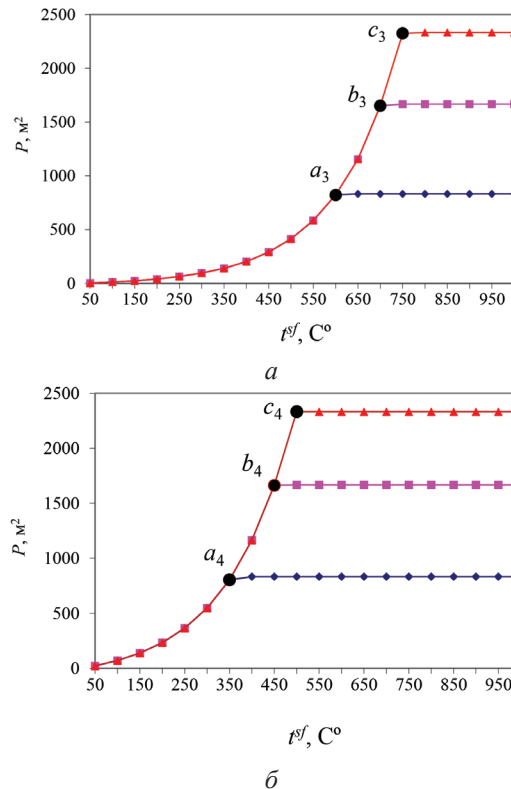


Рис. 2. Зависимость производственной мощности от температуры самовоспламенения теплоизоляции кабины ЛПМ при заданных значениях вместимости бака $V \in \{2500, 5000 \text{ и } 7000 \text{ л}\}$ и производительности оборудования: $a - 7$ л/с; $b - 40$ л/с

Fig. 2. Dependence of production capacity on spontaneous ignition temperature of FFV cabin insulation at specified tank capacity values $V \in \{2500, 5000 \text{ and } 7000 \text{ L}\}$ and equipment performance: $a - 7$ L/s; $b - 40$ L/s

На графике рис. 2, а точки a_3, b_3, c_3 принадлежат температуре самовоспламенения, при которой достигается максимальная производственная мощность для каждого заданного значения вместимости бака ЛПМ и производительности оборудования 7 л/с. Первоначально зависимость $P(V, Q) = f(t^{sf})$ носит степенной характер. При достижении своего максимума P становится константой.

Для решения задачи (5) найдем точку пересечения линий: $y_3 = V/k$ и $y_4 = (Q/k) \cdot f(t^{sf})$.

Получаем: $f(t^{sf}) = f^{-1}(V/Q)$.

Определяем решение задачи (5) для Q_1 :

$$P_3^{\max}(V, Q) = \begin{cases} P_{a_3}^{\max}(V_1, Q_1) = 833; t_{a_3}^{sf} = 602; \\ P_{b_3}^{\max}(V_2, Q_1) = 1667; t_{b_3}^{sf} = 704; \\ P_{c_3}^{\max}(V_3, Q_1) = 2333; t_{c_3}^{sf} = 754. \end{cases} \quad (8)$$

На графике рис. 2, б видно, что при большей производительности оборудования – 40 л/с – производственная мощность растет быстрее и также носит степенной характер. Соответственно, быстрее достигается максимальное значение P для каждого заданного значения вместимости бака ЛПМ. Точки a_4, b_4, c_4 принадлежат температуре самовоспламенения, при которой значение P максимально для каждого заданного значения V . Изначально зависимость $P(V, Q) = f(t^{sf})$ имеет степенной характер. При достижении своего максимума P становится константой.

Получаем: $t^{sf} = f^{-1}(V/Q)$.

Определяем решение задачи (5) для Q_2 :

$$P_4^{\max}(V, Q) = \begin{cases} P_{a_4}^{\max}(V_1, Q_2) = 833; t_{a_4}^{sf} = 355; \\ P_{b_4}^{\max}(V_2, Q_2) = 1667; t_{b_4}^{sf} = 450; \\ P_{c_4}^{\max}(V_3, Q_2) = 2333; t_{c_4}^{sf} = 498. \end{cases} \quad (9)$$

Уравнения (8) и (9) являются решением второй математической задачи оптимизации (5). Расчеты позволили выявить, что при обозначенных начальных и граничных условиях и подаче воды со скоростью 7 л/с получены минимальные значения $t^{sf}(a_3) = 602$ °С, $t^{sf}(b_3) = 704$ °С и $t^{sf}(c_3) = 754$ °С, при которых достигаются максимальные производственные мощности $P^{\max}(a_3) = 833$ м², $P^{\max}(b_3) = 1667$ м² и $P^{\max}(c_3) = 2333$ м². При подаче воды со скоростью 40 л/с получены минимальные значения $t^{sf}(a_4) = 355$ °С, $t^{sf}(b_4) = 450$ °С и $t^{sf}(c_4) = 498$ °С, при которых достигаются максимальные производственные мощности $P^{\max}(a_4) = 833$ м², $P^{\max}(b_4) = 1667$ м² и $P^{\max}(c_4) = 2333$ м².

Таким образом, в рамках работы построена и решена математическая задача оптимизации режимов работы ЛПМ, а также параметров основного и вспомогательного оборудования ЛПМ. Задача позволяет определить максимальную площадь заливки очага пожара за максимально возможный период времени с учетом теплового воздействия со стороны огненной стихии и теплозащитных свойств конструкционных материалов кабины ЛПМ при различных значениях

подачи воды (водных растворов) и вместимости бака ЛПМ на основе заданной тактической схемы тушения лесных пожаров.

При решении задачи используются линейные и степенные функции с заданными ограничениями и областью значений, а также ограничения на управляющие факторы и параметры модели, соответствующие реальным условиям. Корректное применение элементов теории теплопроводности, законов термодинамики и принципов компьютерного моделирования подтверждает адекватность предложенных моделей.

Результаты исследования позволяют: увеличить время нахождения ЛПМ в непосредственной близости от кромки пожара, что повышает возможность эвакуации команды ЛПМ из огненного очага лесного пожара при создании экстремальной ситуации (огненной ловушки, близости фронта пожара в результате смены направления распространения пожара); определить требуемые огнезащитные свойства конструкционных материалов для ЛПМ; рекомендовать теплозащитные материалы ограждений кабин ЛПМ; улучшить эргономические показатели кабин ЛПМ и повысить безопасность условий труда оператора.

Заключение

Сформулирована и решена задача оптимизации параметров и режимов работы лесопожарной машины при тушении лесных пожаров. В качестве целевой функции рассматривается производственная мощность – площадь, которую способна потушить лесопожарная машина. В качестве управляющих факторов принимаются параметры основного и вспомогательного оборудования лесопожарной машины: производительность насосов (скорость подачи воды); вместимость бака; время оцениваемого периода производственного процесса лесопожарной машины и температура самовоспламенения теплоизоляции ограждения кабины лесопожарной машины. Математическая задача оптимизации решена аналитическим методом.

Определены оптимальные параметры работы оборудования лесопожарной машины на основе заданной тактической схемы организации тушения лесного пожара при необходимых требованиях безопасности работы оператора. Рассчитаны минимальное критическое время работы лесопожарной машины, а также минимальная температура самовоспламенения теплоизоляции ограждения кабины лесопожарной машины, при которой достигается максимальная производственная мощность для каждого значения вместимости бака и скорости подачи воды.

Эффективная работа ЛПМ в условиях чрезвычайных ситуаций – тушения лесного пожара, обеспечивает экологическую безопасность с учетом необходимости снижения ущерба, наносимого окружающей среде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. ЕМИСС. Режим доступа: <https://fedstat.ru/> (дата обращения: 06.11.21). *The Unified Interdepartmental Statistical Information System (UISIS)*. (In Russ.).
2. Мазур Д.И., Ермолина М.А. Организационно-правовые меры предупреждения пожаров в России // *Russian Studies in Law and Politics*. 2020. Т. 4, № 3. С. 20–28.
Mazur D.I., Ermolina M.A. Organizational and Legal Measures to Prevent Forest Fires in Russia. *Russian Studies in Law and Politics*, 2020, vol. 4, no. 3, pp. 20–28. (In Russ.).

3. Методики расчета сил и средств для тушения пожаров / сост. Н.Ю. Клименти. Волгоград: ВолгГАСУ, 2013. 28 с.
Methods for Calculating Forces and Means for Extinguishing Fires. Content by N. Yu. Klimenti. Volgograd, VSTU Publ., 2013. 28 p. (In Russ.).
4. Орловский С.Н., Бердникова Л.Н. Оптимизация технологий и средств пожаротушения при борьбе с лесными пожарами // Вестн. КрасГАУ. 2018. № 2(137). С. 84–89.
Orlovsky S.N., Berdnikova L.N. The Optimization of Fire Extinguishment Techniques and Means in Forest Fire Fighting. *The Bulletin of KrasGAU*, 2018, no. 2(137), pp. 84–89. (In Russ.).
5. Повзик Я.С. Пожарная тактика. М.: Спецтехника, 2004. 416 с.
Povzik Ya.S. *Fire Fighting Tactics*. Moscow, Spetstekhnika Publ., 2004. 416 p. (In Russ.).
6. Сосновчик Ю.Ф. Закономерность развития низовых лесных пожаров, метод профилактики и предотвращения распространения низового лесного пожара // Вавиловские чтения – 2017: сб. ст. междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 130-й годовщине со дня рождения акад. Н.И. Вавилова. Саратов: Саратов. ГАУ, 2017. С. 259–266.
Sosnovchik Yu.F. Regularity of Development of Ground Forest Fires, Techniques of Prevention and Suppression of Ground Forest Fire. *Vavilov Readings-2017: Collection of Academic Papers of the International Scientific and Practical Conference Dedicated to the 130th Anniversary since the Birth of Academician N.I. Vavilov*. Saratov, SGAU Publ., 2017, pp. 259–266. (In Russ.).
7. Станкевич Т.С. Прогнозирование пространственного поведения лесного пожара при неопределенности и нестационарности процесса // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 1. С. 20–34.
Stankevich T.S. Forecasting the Spatial Behavior of a Forest Fire at Uncertainty and Instability of the Process. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2021, no. 1, pp. 20–34. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-1-20-34>
8. Устинов А.С., Рогозин С.С., Питухин Е.А. Разработка и реализация математической модели теплового воздействия на ограждающие конструкции, покрытые огнезащитным композитным материалом // Системы. Методы. Технологии. 2018. № 3(39). С. 41–48.
Ustinov A.S., Rogozin S.S., Pitukhin E.A. Development and Implementation of a Mathematical Model of the Thermal Effect on Enclosing Structures Covered with Fire-Retardant Composite Material. *Systems. Methods. Technologies*, 2018, no. 3(39), pp. 41–48. (In Russ.). <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2018-3-41-48>
9. Aslantas M. Finding a Solution to an Optimization Problem and an Application. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 2022, vol. 194, pp. 121–141. <https://doi.org/10.1007/s10957-022-02011-4>
10. Bucur D., Buttazzo G., Nitsch C. Two Optimization Problems in Thermal Insulation. *Notices of the American Mathematical Society*, 2017, vol. 64, no. 8, pp. 830–835. <https://doi.org/10.1090/noti1557>
11. Chandrakantha L. Using Excel Solver in Optimization Problems. *Electronic Proceedings of the 23th Annual International Conference on Technology in Collegiate Mathematics (ICTCM)*. Denver, CO, 2011, pp. 42–49.
12. Chuvieco E., Aguadoa I., Yebraa M., Nieto H., Salas J., Martín M.P. et al. Development of a Framework for Fire Risk Assessment Using Remote Sensing and Geographic Information System Technologies. *Ecological Modelling*, 2010, vol. 221, iss. 1, pp. 46–58. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2008.11.017>
13. Cordeiro Ramalho A.H., da Silva E.F., Martins Silva J.P., Fiedler N.C., Maffioletti F.D., Biazatti L.D., Moreira T.R., Juvanhof R.S., dos Santos A.R. Allocation of Water

Reservoirs to Fight Forest Fires according to the Risk of Occurrence. *Journal of Environmental Management*, 2021, vol. 296, art. 113122. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113122>

14. International Standard. ISO 834–12:2012. *Fire Resistance Tests. Elements of Building Construction. Part 12: Specific Requirements for Separating Elements Evaluated on Less than Full Scale Furnaces*. 2012. 9 p.

15. Kulkarni A.J., Krishnasamy G., Abraham A. *Cohort Intelligence: A Socio-Inspired Optimization Method*. Cham, Springer, 2017. 134 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-44254-9>

16. Momeni M., Soleimani H., Shahparvari S., Afshar-Nadjafi B. Coordinated Routing System for Fire Detection by Patrolling Trucks with Drones. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2022, vol. 73, art. 102859. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2022.102859>

17. Schittkowski K., Zillober C. *Nonlinear Programming: Algorithms, Software, and Applications. System Modeling and Optimization*. Ed. by J. Cagnol, J.P. Zolésio. Boston, MA, Springer, 2005, vol. 166, pp. 73–107. https://doi.org/10.1007/0-387-23467-5_5

18. Ustinov A., Pitukhin E. Improving the Efficiency of Protection of the Forest Fire Machine against Forest Fires with the Help of Composite Materials. *Materials Science Forum*. Switzerland, Trans. Tech. Publications Ltd, 2020, vol. 992, pp. 700–705. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.992.700>

19. Wu P., Chu F., Che A., Zhou M. Bi-Objective Scheduling of Fire Engines for Fighting Forest Fires: New Optimization Approaches. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2018, vol. 19, iss. 4, pp. 1140–1151. <https://doi.org/10.1109/TITS.2017.2717188>

20. Zhou J., Tu C., Reniers G. Simulation Analysis of Fire Truck Scheduling Strategies for Fighting Oil Fires. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2020, vol. 67, art. 104205. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2020.104205>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article