

Львівський державний університет безпеки життєдіяльності
ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Товарянський Володимир Ігорович

УДК 614.841.2

ДИСЕРТАЦІЯ

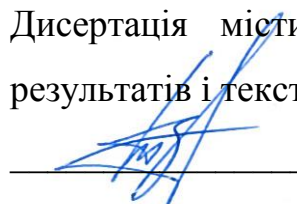
ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ В МОЛОДИХ СОСНОВИХ ЛІСАХ УКРАЇНИ

Спеціальність – 21.06.02 «Пожежна безпека»

Галузь знань – 261 «Пожежна безпека»

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

 В. І. Товарянський

Науковий керівник

Кузик Андрій Данилович,

доктор сільськогосподарських наук, професор

Львів – 2017

АНОТАЦІЯ

Товарянський В.І. Підвищення ефективності забезпечення пожежної безпеки в молодих соснових лісах України. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 21.06.02 «Пожежна безпека». – Львівський державний університет безпеки життєдіяльності ДСНС України, Львів, 2017.

Зміст анотації

Дисертація присвячена вирішенню актуального наукового завдання – підвищення ефективності забезпечення пожежної безпеки в молодих соснових лісах України.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи та важливість підвищення ефективності забезпечення пожежної безпеки в молодих соснових лісах України, сформульовано ідею, мету і визначено завдання досліджень, відображено наукову новизну роботи та практичне значення отриманих результатів. Наведено відомості про апробацію та публікування основних результатів дослідження.

У **першому розділі** наведено результати аналізу даних про статистику лісових пожеж, зокрема молодих соснових насаджень у світі та Україні, особливості виникнення і поширення горіння у середовищі соснових насаджень, моделювання лісових пожеж, системи забезпечення пожежної безпеки соснових насаджень лісового фонду України. На основі наукових праць вітчизняних та зарубіжних вчених, аналізу сучасного стану лісових насаджень та їх пожежної небезпеки встановлено, що поширені в Україні насадження сосни звичайної у молодому віці є більш пожежонебезпечними, ніж старшого віку, а також порівняно з молодими насадженнями інших порід дерев. Проте недостатньо досліджені причини підвищеної пожежної небезпеки та її залежності від віку та інших чинників.

У другому розділі наведено методологію, а також методи і методики теоретичних та експериментальних досліджень з розкриття особливостей впливу чинників на пожежну небезпеку молодих соснових насаджень лісового фонду України, зокрема: метод визначення вологості хвої соснових насаджень у лабораторних та польових умовах; методику визначення масового вмісту органічної рідини – продукту піролізу хвої соснових насаджень, методику визначення масової швидкості вигорання хвої соснових насаджень; методику визначення температури та проміжку часу до займання хвої соснових насаджень у лабораторних умовах від полуменевого джерела; методику визначення лінійної швидкості поширення горіння підстилки соснових молодняків за умовами погоди; методику визначення лінійної швидкості поширення пожежі молодих соснових насаджень у польових умовах; методику визначення лінійної швидкості поширення пожежі молодих соснових насаджень з використанням комп'ютерного моделювання.

У третьому розділі проведено експериментальні дослідження з виявлення впливу чинників на показники пожежної небезпеки хвої ділянок молодих соснових насаджень. Встановлено, що вік насаджень впливає на вміст складової органічної рідини у хвої соснових насаджень. Значення вмісту складової органічної рідини у свіжозірваній хвої соснових насаджень віком до 10 років перевищує майже в 2 рази цей показник для опалої хвої. Значення вмісту складової органічної рідини у свіжозірваній хвої соснових насаджень віком понад 20 років аналогічно перевищує вдвічі цей показник для опалої хвої. Для досліджених зразків хвої молодих соснових насаджень вміст в них органічної горючої рідини, як одного з чинників впливу на пожежну небезпеку соснових насаджень, зменшується в ряду: свіжозірвана віком до 10 років – свіжозірвана віком понад 20 років – опала віком до 10 років та понад 20 років. За результатами експериментальних досліджень з визначення впливу вологості хвої соснових насаджень на масову швидкість її вигорання встановлено, що масова швидкість вигорання хвої соснових насаджень залежить від її вологості, зокрема найбільша швидкість вигорання притаманна висушеній хвої,

дещо менша – опалій у складі підстилки, а найменша – свіжозірваній. Експериментальними дослідженнями з виявлення впливу вологості хвої соснових насаджень на її температуру займання та проміжок часу до займання виявлено, що зменшення значень температури займання та тривалості часу до займання зумовлені зниженням вологості хвої внаслідок висушування. Висушена хвоя, зокрема, яка входить до складу підстилки молодих соснових насаджень, є більш пожежонебезпечною, швидко займається та сприяє поширенню пожеж. За результатами експериментальних досліджень з виявлення впливу погодних умов на швидкість поширення горіння підстилки соснових молодняків встановлено, що найбільшою є швидкість поширення полум'я підстилкою за умов сонячної погоди (за відсутності опадів), середнє значення якої майже втричі перевищує значення швидкості поширення полум'я за умов випадання 4 мм опадів. Експериментальними дослідженнями у польових умовах з виявлення можливості переходу низової лісової пожежі у верхову встановлено, що у разі відсутності трав'яного покриву, за відповідних метеорологічних умов, на 62 с від початку горіння низова лісова пожежа перейшла у верхову, спричинивши за 90 с пошкодження соснових насаджень на площі 4,5 м². Проведені експериментальні дослідження у польових умовах та моделювання у WFDS підтверджують високу пожежну небезпеку молодих соснових насаджень та швидкий перехід пожежі з низової у верхову. Отримане значення дисперсії розсіювання за результатом експерименту 0,037 практично співпадає з значенням дисперсії, отриманим за результатами моделювання 0,031, що засвідчує адекватність цієї моделі та її придатність для її застосування в системі забезпечення пожежної безпеки молодих соснових насаджень. За результатами дослідження з виявлення впливу змінення компонентів фітомаси молодих соснових насаджень на показники їх пожежної небезпеки встановлено, що з віком загальна фітомаса та вміст вологи в соснових насадженнях збільшується, зумовлюючи зменшення пожежної небезпеки.

У четвертому розділі проведено математичне моделювання займання хвої сосни звичайної. Застосовано 3 моделі поширення тепла, зокрема, поширення тепла хвоїнкою скінченої довжини за відсутності теплообміну на її бічній поверхні, теплопровідності хвоїнки нескінченої довжини за наявності теплообміну на її бічній поверхні, а також нагрівання хвоїнки на деякій висоті над нагрітою до високої температури нерухомою поверхнею прямокутної форми. Використано довідкові дані та результати лабораторних досліджень, які застосовано у моделях як фізичні та теплофізичні показники хвої сосни звичайної: вологість, теплопровідність, теплоємність та густина, а також температура самозаймання. У першій моделі один з кінців хвоїнки контактує з нагрітим до високої температури тілом. Температура хвоїнки в початковий момент часу є сталою і дорівнює температурі повітря. Така ж температура і кінця хвоїнки, який не контактує з нагрітим тілом. Аналітичний розв'язок, отриманий в результаті інтегрування диференціальних рівнянь, що описують даний процес, а також побудова графічних залежностей свідчать про те, що температура сухої хвої зростає швидше, ніж живої, прогріваючи її на більшу довжину за однаковий період часу, і це зумовлює її швидше займання. У другій моделі розглянуто хвоїнку нескінченої довжини, до кінця якої торкається нагріте тіло, а на її бічній поверхні відбувається конвективний теплообмін. Розв'язками рівняння з відповідними початковою та граничними умовами є залежності температури від тривалості та відстані до місця контакту, за якими можна встановити час та ширину ділянки хвої, нагрітої до температури самозаймання. Третя математична модель описує процес нагрівання хвоїнки внаслідок радіаційного теплового випромінювання з поверхні полум'я у формі прямокутника. Аналітичний розв'язок моделі дає змогу встановити час нагрівання хвоїнки до температури самозаймання.

Проведено дослідження пожежної небезпеки соснових молодняків залежно від віку методом комп'ютерного моделювання лісової пожежі у WFDS. Оцінено пожежну небезпеку в повних молодих соснових насадженнях віком 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 і 40 років за швидкістю поширення фронту пожежі з

урахуванням самозрідження деревостанів та самоочищення стовбурів дерев від нижніх гілок. При цьому наземним горючим матеріалом у насадженнях віком 5 років розглядали суху траву, а у старшому віці – хвойну підстилку. Отримано значення швидкостей поширення низової та верхової пожежі за наявності переходу в таку форму. Встановлено, що перехід низової пожежі у верхову форму відбувається в насадженнях віком до 20 років, що спричиняє значне збільшення швидкості поширення пожежі та свідчить про їх значну пожежну небезпеку. Для насаджень віком від 20 до 40 років перехід низової пожежі у верхову не відбувається, проте зростає швидкість поширення низової пожежі.

У **п'ятому розділі** наведено інформацію щодо апробації та впровадження результатів дисертаційної роботи. За результатами польових досліджень з використанням запропонованого Пристрою для дослідження займистості горючого матеріалу з використанням електронагрівального елемента, встановлено, що лісова підстилка в соснових молодняках є пожежонебезпечною і може зайнятися з ймовірністю, близькою до 1/2 від джерела з температурою 450 °C за 25,7 с. Відповідно до результатів дослідження встановлено, що інтенсивність зростання площі, пройденої вогнем, є найбільшою у віці 5 років. За об'ємом ушкодженої пожежею деревини економічні збитки будуть найбільшими для 20-річних насаджень. Інтенсивність зростання об'єму непридатної для реалізації деревини зростає з віком та із зростанням швидкості вітру, а її значення є найбільшим для 20-річних соснових насаджень. Запропоновано шкалу оцінки природної пожежної небезпеки земельних ділянок лісового фонду, відповідно до якої I клас пожежної небезпеки ділиться на 2 підкласи: Ia – для соснових насаджень віком 5-20 років, де протягом усього пожежонебезпечного періоду є підвищена загроза виникнення низових лісових пожеж з переходом у верхові, та Ib – віком 20-40 років, де протягом усього пожежонебезпечного періоду є загроза виникнення низових лісових пожеж без переходу у верхові. Результати дисертаційної роботи впроваджені в діяльність в діяльність «ДП Рава-Руське лісове господарство», «ДЛГП Галсільліс», а також використовуються під час

викладання навчальних дисциплін «Небезпечні природні процеси» і «Лісова пірологія» у Львівському державному університеті безпеки життєдіяльності, про що складено відповідні акти.

Ключові слова: соснові молодняки, пожежа, пожежна безпека, пожежна небезпека, лісові горючі матеріали, повний деревостан, діелектрична проникність, швидкість поширення пожежі, комп'ютерна модель, візуалізація процесу моделювання, теплота згоряння, рівняння теплопровідності, радіаційне теплове випромінювання.

SUMMARY

Tovaryansky V. I. Improvement the effectiveness of fire safety in young pine stands of Ukraine. – Qualification scientific work on the manuscript.

Thesis for a candidate degree (PhD) in specialty 21.06.02 "Fire Safety". – Lviv State University of Life Safety SES of Ukraine, Lviv, 2017.

Dissertation deals with the actual scientific and technical task – increasing the security assurance of fire safety in young pine forests of Ukraine.

The **introduction** elucidates the relevance of the subject of the dissertation, discloses the importance of improving the fire protection of coniferous, in particular, the pine stands in young age, formulates the idea, purpose and defines the research task, reflects the scientific novelty of the work and practical significance of the results. Information on approbation and publication of the main research results is provided.

The **first section** analyzes statistics of forest fires, in particular fires of coniferous young in Ukraine and the world, features of occurrence and spread of combustion in the environment of pine stands, existing models of forest fires and system of fire safety security in young pine forests of Ukraine. Based on results of local and foreign scientific works, analysis of the current state of forest plantations and their level of fire safety, was established that common pine plants planted in Ukraine at young age are more fragile than older ones, as well as in comparison with young plantings of other tree species. However, the reasons for the increased fire hazard of pine plantation and its dependence on age and other factors are insufficiently investigated.

The **second section** describes the methods of theoretical and experimental researches on the disclosure of the impact factors peculiarities on the fire hazard of young pine stands of the land plots fund of Ukraine. A method of determining the pine needles moisture content in laboratory and field conditions, a method of determining the organic liquid mass content as a pyrolysis product of pine needles, a method of determining the mass burning rate of needles of young pine stands, a method of determining the temperature and time of young pine stands needles ignition from a flame source at laboratory conditions, a method of determining the linear flame propagation velocity of young pine stands underlay depending on weather conditions, a method of determining the linear flame propagation velocity of young pine forest stands in field conditions and a method of determining the linear flame propagation velocity of young pine forest stands using computer simulation was used for research.

The **third section** include experimental researches on young pine stands fire hazard level. There has been established that the age of plantations affects the content of the pine needles organic liquid component. The value of the organic liquid content in freshly torn pine needles of the 10-year-old pine stands is twice as large as compared to needles that belong to forest underlay. The value of the organic liquid content in freshly torn pine needles of the 20-year-old pine stands similarly twice as large as compared to needles that belong to forest underlay. For the studied samples of young pine needles, the content of organic liquid in them, as one of the factors influencing fire hazard of pine plantations, decreases in the number of fresh under the age to 10 years and fresh over 20 years old, fallen down under the age to 10 years and over 20 years. The results of experimental studies to determine the impact of pine stands needles humidity on the mass rate of its burnout found that the mass rate of pine needles burning depends on its humidity, in particular, the highest rate of burning is inherent in dried needles, smaller one inherent in the composition of forest underlay, and the smallest – in fresh needles. Experimental studies on the detection of the influence of pine plantations moisture content on its ignition temperature and the time interval before the ignition revealed that the decrease in the values of the ignition temperature and the duration of time before ignition is caused by a decrease

in the needles moisture content due to drying. Dry pine needles, in particular, ones that belong to forest underlay, are more fire fragile, quicker engaged and contribute to the spread of fires. According to the experimental studies results on the influence of weather conditions on the pine underlay propagation velocity, established that the greatest is the rate of propagation of flame under the conditions of sunny weather (in the absence of precipitation), the average value of which is almost three times greater than the value of the flame conditions propagation velocity of precipitation in amount of 4 mm. Experimental researches in field conditions on the disclosure impact of the possibility ground forest fire transition to the top fire set up that due to the certain meteorological conditions in the absence of grass cover, ground fire starting at 62 seconds from the start of combustion moved to the top, causing for 90 second damage to pine stands in the area of 4.5 m². Experimental researches in the field conditions and simulation in the WFDS confirm the high fire hazard of young pine stands and the rapid transition from ground fire to top fire. The obtained value of dispersion of scattering by the result of the experiment 0.037 practically coincides with the value of the dispersion obtained by the modeling results 0.031, which confirms the adequacy of this model and its suitability for application in the system of providing fire safety of young pine stands. Experimental researches on the disclosure impact of changing the young pine stands phytomass components on the indicators of their fire hazard established that with age the total phytomass and moisture content in pine plantations increases, causing a decrease in fire hazard.

The **fourth section** describes mathematical and computer modeling fire spread of young pine stands. Mathematical modeling of ignition processes in pine needles has been conducted. There were considered three models of heat transfer, including heat distribution within the needle of finite length without any heat exchange on its surface, heat distribution within the needle of infinite length with the availability of heat exchange on its surface and heating the needle at some height above the high temperature stationary rectangular-shaped surface. Reference data and results of laboratory studies that were applied in the models as physical and thermophysical indices of pine needles usual: humidity, heat conductivity, heat capacity and density,

and also the temperature of self-ignition, were used. In the first case, one end of a needle contacted with heated body. Initial temperature of a needle was constant and equal to the air temperature as well as the temperature of another end of the needle (which didn't contact with the hot body). The analytical solution obtained by integrating the differential equations allowed to describe the process and to build graphical dependencies. There was conducted that the temperature of dry needle grows faster than the temperature of alive needle, warming it at greater length for the same period and causing faster ignition. In the second model the needle of infinite length with the availability of heat exchange on its surface was explored. Solutions of the equations with the corresponding initial and boundary conditions are the temperature dependence of the time and distance to the contact point that allows you to set the time and width of the area of the needle heated to the temperature of self-ignition. The third mathematical model describes the process heating the needle at some height above the high temperature stationary rectangular-shaped surface. The analytical solution of the model allows setting the time of heating the needle to the self-ignition temperature.

Research of fire hazard young pine stands depending on the age of young pine with method of computer modeling of forest fires in the model WFDS was conducted. Fire hazard in 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 and 40-years full young pine stands via velocity of the front of the fire using growth models of stands and Self-cleaning of the lower branches trees trunks was evaluated. The combustible material on the ground in 5-year stands was dry grass and in older age – pine underlay. The speeds of spread of ground and top fires and transition from ground to top fires was obtained. It was established that the transition of a ground fire to the top forms occurs in pine stands under the age of 20 years, which causes a significant increase in the speed of the spread of the fire and indicates their significant fire danger. For pine stands from the age of 20 to 40 years transition from ground to top fires does not occur, although the rate of ground fires distribution increase.

The **fifth section** contains information on approbation and introduction of dissertation work results. According to the results of field research using the

apparatus for investigating the flammability of combustible material with a help of the heating element, it has been established that the forest underlay of young pine stands is fire hazard and catch fire with a probability close to 1/2 of the source with a temperature of 450 °C for 25.7 seconds. According to the results of the study, it was found that the intensity of the growth of the area, covered by the fire, is the largest at the age of 5 years. By the volume of wood damaged by the fire, the economic losses will be greatest for 20-year-old stands. The intensity of the wood growth unsuitable for implementation increases with age and with increasing wind speed, and its value is greatest for the 20-year-old pine stands. The estimation scale of the natural fire hazard of forest land plots is proposed, according to which the 1st class of fire danger is divided into 2 subclasses: Ia - for pine stands aged 5-20 years, where during the entire period of fire there is an increased threat of the occurrence of ground forest fires with the transition to the top, and Ib - for pine stands aged more than 20 years where during the fire hazard period there threat of ground forest fires without a transition to the top. The results of the dissertation work introduced into the activity of the State Enterprise "Rava-Ruska forestry", State Enterprise "Galsillys", and used during the teaching of the disciplines "Dangerous natural processes" and "Forest Pirology" at the Lviv State University of Life Safety, which is certified by the relevant acts.

Key words: pine stands, fire safety, fire hazard, forest combustible materials, full pine stand, permittivity, spreading velocity of fire, computer model, combustion temperature, heat transfer equation, radiation heat transfer.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові статті у фахових виданнях

1. Кузик А. Д., Товарянський В. І. Про пожежну небезпеку молодих соснових насаджень. *Пожежна безпека* : Збірник наукових праць. ЛДУ БЖД. Львів, 2014. № 24. С. 68—73.

2. Кузик А. Д., Товарянський В. І. Масова швидкість вигорання хвої сосни звичайної як показник пожежної небезпеки. *Пожежна безпека : Збірник наукових праць*. ЛДУ БЖД. Львів, 2014. № 25. С. 57—61.

3. Товарянський В. І., Кузик А. Д., Петровський В. Л. Взаємозв'язок між температурою та часом до займання хвої молодих соснових насаджень. *Пожежна безпека : Збірник наукових праць*. ЛДУ БЖД. Львів, 2015. № 26. С. 167—171.

4. Товарянський В. І., Кузик А. Д. Дослідження пожежі молодих соснових насаджень. *Пожежна безпека : Збірник наукових праць*. ЛДУ БЖД. Львів, 2016. № 28. С. 113—120.

5. Товарянський В. І., Кузик А. Д. Оцінювання залежності пожежної небезпеки соснових молодняків від віку. *Науковий вісник НЛТУ України : зб. наук.-техн. праць*. Львів, 2016. Вип. 26.5. С. 220—226.

6. Кузик А. Д., Товарянський В. І. Математичне моделювання процесів кондуктивного і радіаційного теплообміну під час пожежі в соснових лісах. *Пожежна безпека : Збірник наукових праць*. ЛДУ БЖД. Львів, 2017. № 30. С. 105—113.

Наукова стаття в іноземному виданні

7. Кузык А. Д., Товарянский В. И. Оценка влажности хвои сосны обыкновенной как фактора пожарной опасности по измерению ее диэлектрической проницаемости. *Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza*. Józefów, 2015. Vol. 39, Issue 3. Pp. 111—117.

Матеріали та тези конференцій

1. Товарянський В. І. Залежність вологості хвої сосни звичайної від її діелектричної проникності як фактор пожежної небезпеки. *Всеукраїнська науково-практична конференції рятувальників: матеріали наук.-практ. конф.* (Київ, 23–24 вересня 2014). Київ, 2014. С. 294—296.

2. Кузик А. Д., Товарянський В. І. Масова швидкість вигорання хвої сосни звичайної як показник пожежної небезпеки. Надзвичайні ситуації: безпека та захист. Матеріали Всеукраїнської наук.-практ. конф. з міжнародною участю. (Черкаси, 9–10 жовтня 2015). Черкаси, 2015. С. 84—86.

3. Кузык А. Д., Товарянский В. И. Пожароопасные свойства хвои сосны обыкновенной в возрасте молодняка. *Чрезвычайные ситуации: теория, практика, инновации ЧС* : матер. науч.-техн. конф. Гомель, 2016. С. 94—95.

4. Кузик А. Д., Товарянський В. І. Моделювання пожежі соснових молодняків. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій*: матеріали VII Міжнар. наук.-практ. конф. (Черкаси, 19–20 травня). ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. Черкаси, 2016. С. 219—220.

5. Товарянський В. І., Кузик А. Д. Пожежна небезпека молодих соснових насаджень та шляхи її вирішення. *Проблеми екологічної безпеки*: зб. тез доповідей XIV Міжнародної наук.-практ. конф. (Кременчук, 12–14 жовтня 2016) Кременчук, 2016. С. 115.

6. Товарянський В. І., Кузик А. Д. Моделювання пожежі соснових насаджень у молодому віці. *Пожежна та техногенна безпека. Теорія, практика, інновації*: матеріали міжнародної наук.-практ. конф. Львів, 2016. С. 219—220.

7. Кузик А. Д., Товарянський В. І. Пожежонебезпечні властивості хвойної підстилки соснових молодняків. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій*: матеріали VIII Міжнар. наук.-практ. конф. (Черкаси, 19–20 травня). ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. Черкаси, 2017. С. 206—207.

8. Товарянський В. І., Кузик А. Д., Драч К. Л. Дослідження пожежної небезпеки підстилки соснових молодняків за умовами погоди. *Сучасний стан цивільного захисту України та перспективи розвитку*: матеріали 19 Всеукраїнської наук.-практ. конф. «Технології захисту/ПожТех – 2017» (Київ, 10–11 жовтня). Київ, 2017. С. 428—207.

Патент

1. Патент на корисну модель 106652 Україна, МПК51 (2016.01) G01N 25/00. Пристрій для дослідження займистості горючого матеріалу з використанням електронагрівального елемента. Бюл. №8. 2016.

PUBLICATIONS LIST OF THE POSTGRADUATE

Scientific articles in professional editions

1. Kuzyk A. D., Tovaryansky V. I. . On young pinery fire hazard. *Fire Safety : Scientific Journal of Lviv State University of Life Safety*. Lviv, 2014. No 24. Pp. 68—73.

2. Kuzyk A. D., Tovaryansky V. I. . Mass loss velocity burning needles of pine as an indicator of fire hazard. *Fire Safety : Scientific Journal of Lviv State University of Life Safety*. Lviv, 2014. No 24. Pp. 57—61.

3. Tovaryansky V. I., Kuzyk A. D., Petrovskyi V. L. Relation between temperature and ignition time of needles of young pine stands. *Fire Safety : Scientific Journal of Lviv State University of Life Safety*. Lviv, 2015. No 26. Pp. 167—171.

4. Tovaryansky V. I. , Kuzyk A. D. . Research of forest fires in young pineries. *Fire Safety : Scientific Journal of Lviv State University of Life Safety*. Lviv, 2016. No 28. Pp. 113—120.

5. Tovaryansky V. I., Kuzyk A. D. Evaluation of the dependence of fire hazard of young pine stands of age. *Scientific Bulletin of Ukrainian National Forestry University*. Lviv, 2016. Vol. 26. Issue 5. Pp. 220—226.

6. Kuzyk A. D., Tovaryansky V. I. Mathematical modeling of conductive and radiative heat transfer during a fire in pine forests. *Fire Safety : Scientific Journal of Lviv State University of Life Safety*. Lviv, 2017. No 30. Pp. 105—113.

Scientific article in foreign edition

7. Kuzyk A. D., Tovaryansky V. I. Pine needles humidity dependence of factor in the fire hazard on the dielectric constant. *Safety & Fire Technique Journal: Józefów*, 2015. Vol. 39, Issue 3. Pp. 111—117.

Materials and theses of conferences

1. Tovariansky V. I. Pine needles humidity dependence of factor in the fire hazard on the dielectric constant. *Ukrainian scientific and practical conference of rescuers: Proceedings of Scientific and Practical Conference* (Kyiv, 23–24 Sept. 2014). Kyiv, 2014. Pp. 294—296.

2. Kuzyk A. D., Tovariansky V. I. Mass loss velocity burning needles of pine as an factor of fire hazard. *Emergency. Safety and protection*. Materials of Ukrainian Scientific and Practical Conference with International Participation. (Cherkasy, 9-10 Oct. 2015). Cherkasy, 2015. Pp. 84—86.

3. Kuzyk A. D., Tovariansky V. I. Fire Modeling of young pine stands. *Theory and practice fighting fires and elimination of emergencies: Materials of VII Ukrainian Scientific and Practical Conference* (Cherkasy, 19–20 May). Cherkasy Institute of Fire Safety. Cherkasy, 2016. Pp. 219—220.

4. Kuzyk A. D., Tovariansky V. I. Fire properties of pine litter young coniferous plantations. *Theory and practice fighting fires and elimination of emergencies: Materials of VII Ukrainian Scientific and Practical Conference* (Cherkasy, 19–20 May). Cherkasy Institute of Fire Safety. Cherkasy, 2016. Pp. 219—220.

5. Tovariansky V. I., Kuzyk A. D. Fire danger of young pine stands and ways to solve it. *The problems of ecological safety: collection theses lectures of XIV International Scientific and Practice Conference* (Kremenchuk, 12-14 Oct.) Kremenchuk, 2016. P. 115.

6. Tovariansky V. I., Kuzyk A. D. Model simulation of fire pine stands at a young age. *Fire and technological safety: theory, practice, innovations*. Materials of International Scientific and Practical Conference (Lviv State University of Life Safety 2016) Lviv, 2016. Pp. 219—220.

7. Kuzyk A. D., Tovariansky V. I. Fire hazard of young pine forest litter *Theory and practice fighting fires and elimination of emergencies: Materials of VIII Ukrainian scientific and practical conference* (Cherkasy, 19–20 May). Cherkasy Institute of Fire Safety. Cherkasy, 2016. Pp. 206—207.

8. Tovariansky V.I., Kuzyk A.D., Drach K. L. Fire hazard investigation of litter of young pine stands under weather conditions. *The current state of civil defense of Ukraine and prospects for development: Materials of the 19th All-Ukrainian Scientific and Practical Conference "Protection Technologies / PozhTeh - 2017"* (Kyiv, 10-11 October). Kyiv, 2017. Pp. 428—207.

Patent

1. Patent of Ukraine No.106652, MPC51 (2016.01) G01N 25/00. Device for Research Flammability of Combustible Materials with use Electric Heating Element Bull. No. 8, 2016.

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень.....	20
ВСТУП.....	21
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАТИСТИКИ ЛІСОВИХ ПОЖЕЖ ТА СУЧАСНОГО СТАНУ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ СОСНОВИХ НАСАДЖЕНЬ ЛІСОВОГО ФОНДУ УКРАЇНИ	27
1.1. Аналіз світової та національної статистики лісових пожеж	29
1.2. Особливості виникнення і поширення горіння у середовищі соснових насаджень	36
1.3. Моделювання лісових пожеж.....	42
1.4. Система забезпечення пожежної безпеки соснових насаджень лісового фонду України	46
1.5. Ідея роботи, мета та завдання досліджень	49
РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЯ ТА МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ	50
2.1. Обґрунтування методології та методів досліджень з розкриття особливостей впливу чинників на пожежну небезпеку молодих соснових насаджень лісового фонду України	51
2.2. Визначення вологості хвої молодих соснових насаджень методом дієлькометрії.....	53
2.3. Визначення масового вмісту органічної рідини – продукту піролізу хвої соснових насаджень.....	57
2.4. Методика визначення масової швидкості вигорання хвої соснових насаджень.....	59
2.5. Методика визначення температури та проміжку часу до займання хвої соснових насаджень від полуменевого джерела у лабораторних умовах.....	61
2.6. Методика визначення проміжку часу до займання хвої соснових насаджень від високотемпературного джерела у польових та лабораторних умовах.....	63

2.7. Методика визначення лінійної швидкості поширення горіння підстилки соснових молодняків за умовами погоди.....	66
2.8. Методика визначення лінійної швидкості поширення пожежі молодих соснових насаджень у польових умовах	67
2.9. Методика визначення лінійної швидкості поширення пожежі молодих соснових насаджень з використанням комп'ютерного моделювання.....	69
2.10. Висновки за розділом.....	70
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ	72
3.1. Дослідження з виявлення впливу чинників на показники пожежної небезпеки хвої ділянок молодих соснових насаджень	72
3.1.1. Дослідження вмісту органічної рідини – продукту піролізу хвої сосни звичайної у молодому віці	72
3.1.2. Експериментальні дослідження з виявлення залежності масової швидкості вигорання хвої соснових насаджень від її вологості.....	75
3.1.3. Експериментальні дослідження з виявлення впливу вологості на температуру займання та проміжок часу до займання хвої молодих соснових насаджень у лабораторних умовах	78
3.2. Експериментальні дослідження з виявлення впливу погодних умов на швидкість поширення горіння підстилки соснових молодняків	83
3.3. Експериментальні дослідження у польових умовах з виявлення можливості переходу низової лісової пожежі у верхову	85
3.4. Експериментальні дослідження у польових умовах з визначення лінійної швидкості поширення пожежі молодих соснових насаджень віком до 10 років.....	88
3.5. Дослідження з виявлення впливу змінення компонентів фітомаси молодих соснових насаджень на показники їх пожежної небезпеки	96
3.6. Висновки за розділом	101
РОЗДІЛ 4. МАТЕМАТИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЗАЙМАННЯ, ВИНИКНЕННЯ ТА ПОШИРЕННЯ ПОЖЕЖ МОЛОДИХ СОСНОВИХ НАСАДЖЕНЬ	103

4.1. Математичне моделювання процесів займання хвої на початковій стадії пожежі	103
4.1.1. Займання хвої внаслідок кондуктивного теплообміну з джерелом тепла	103
4.1.2. Займання хвої внаслідок радіаційного теплообміну	111
4.2. Особливості зміни структури соснових насаджень та самоочищення стовбурів у процесі росту	116
4.3. Комп'ютерне моделювання пожежі молодих соснових насаджень	119
4.4. Висновки за розділом	131
РОЗДІЛ 5. АПРОБУВАННЯ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	132
5.1. Результати досліджень займання хвойної та трав'яної підстилки соснових молодняків в лісовому господарстві.....	132
5.2. Економічне обґрунтування залучення сил і засобів для гасіння пожежі соснових молодняків	134
5.3. Удосконалення «Шкали оцінки природної пожежної небезпеки земельних ділянок лісового фонду України»	140
5.4. Висновки за розділом.....	142
ВИСНОВКИ.....	143
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	146
ДОДАТКИ.....	159
ДОДАТОК А Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.....	160
ДОДАТОК Б Протоколи проведення досліджень у лабораторних умовах	163
ДОДАТОК В Ксерокопія патенту України на корисну модель №106652	173
ДОДАТОК Д Акти впровадження результатів дисертаційної роботи.....	177
Акт впровадження результатів дисертаційної роботи в діяльність ДП «Рава-Руське лісове господарство».....	178
Акт впровадження результатів дисертаційної роботи в діяльність ДЛГП «Галсільліс».....	179
Акт впровадження ЛДУ БЖД ДСНС України.....	180

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ДП	Державне підприємство
ДПРЧ	Державна пожежно-рятувальна частина
ДСНС	Державна служба України з надзвичайних ситуацій
МПК	Місцева пожежна команда
ОРС ЦЗ	Оперативно-рятувальна служба цивільного захисту
ТУМ	Типи умов місцезростання
ТХА	Термопара хромель-алюмель
WFDS	Wildland-Urban Interface Fire Dynamics Simulator

ВСТУП

Актуальність теми. Результати аналізу статистичних даних світового та вітчизняного досвіду з питань забезпечення пожежної безпеки лісів, зокрема свідчать, що у 2014 році тільки в Росії відбулось 16865, Польщі – 4685, а в Україні – понад 2 тис лісових пожеж, які призвели до значних матеріальних та екологічних збитків. При цьому знищується лісовий фонд, завдаються збитки для флори, фауни та біосфери. Також проявом небезпечного чинника лісових пожеж є викиди парникових газів. Тільки впродовж 2014 року їх обсяг в Україні досяг таких значень: вуглекислого газу 342,02; чадного газу 23,32; метану 1,02; оксидів азоту 0,65 тис. тонн відповідно. Наймасштабніші лісові пожежі класифікуються як надзвичайні ситуації природного характеру.

Пожежну небезпеку лісів, зокрема і хвойних, досліджували Е. С. Арцибашев, О. Г. Бабіч, А. Д. Вакуров, О. М. Гришин, Е. М. Гуліда, Г. А. Доррер, С. І. Душа-Гудим, В. М. Ефіменко, А. В. Захаревич, С. В. Зібцев, Е. В. Конев, А. Д. Кузик, Н. П. Курбатський, І. С. Мелехов, В. Г. Нестеров, С. А. Полосинов, В. Є. Свириденко, М. А. Софронов, О. А. Тарасенко, А. Й. Швиденко, F. A. Albini, Van Wagner, R. O. Weber, W. H. Frandsen, R. C. Rothermel, W. R. Stevens, R. Szczygieł та інші. Основну увагу в їх дослідженнях приділено фізико-хімічним властивостям дерев та їх компонентів, параметрам займання, які впливають на опад та підстилку, самозайманню, горінню елементів дерева; процесам поширення полум'я ліською підстилкою та кронами дерев; впливам на пожежну небезпеку різноманітних природних та антропогенних факторів, таких як рельєф місцевості, кліматично-погодні умови та людська діяльність тощо. Проте в їх роботах не достатньо висвітлено питання процесів формування пожежної небезпеки соснових молодняків ліскового фонду України, а також впливу чинників на процеси виникнення та поширення в них пожеж.

Розкриття особливостей впливу чинників на пожежну небезпеку соснових молодняків ліскового фонду України є важливим науковим завданням, розв'язання

якого створить передумови підвищення ефективності забезпечення пожежної безпеки в молодих соснових лісах України.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалась відповідно до Концепції Державної цільової соціальної програми забезпечення пожежної безпеки на 2012–2015 р.р., схваленої розпорядженням Кабінету Міністрів України від 29.12.2010 року № 2348; Державної цільової соціальної програми забезпечення пожежної безпеки на 2012–2015 р.р., затвердженої постановою Кабінету Міністрів України від 27.06.2012 № 590 під час виконання науково-дослідної роботи у Львівському державному університеті безпеки життєдіяльності за держбюджетною темою «Пожежна небезпека соснових насаджень у молодому віці» (номер державної реєстрації 0114U005417), у якій дисертант був виконавцем.

Ідея роботи полягає у підвищенні ефективності забезпечення пожежної безпеки в молодих соснових лісах України шляхом удосконалення методології та методики оцінювання їх природної пожежної небезпеки, яка враховує особливості впливу чинників на її стан.

Мета роботи – розкриття особливостей впливу чинників на пожежну небезпеку соснових молодняків лісового фонду України як наукового підґрунтя підвищення ефективності забезпечення їх пожежної безпеки.

Завдання дослідження. Для досягнення поставленої мети визначено до розв'язання наступні завдання досліджень:

- здійснити аналіз світової та національної статистики лісових пожеж, а також сучасного стану забезпечення пожежної безпеки соснових насаджень лісового фонду України та виявити шляхи його покращання;

- обґрунтувати та апробувати застосування методу діелькометрії для визначення вологості хвої як чинника впливу на показники її пожежної небезпеки, а також розробити пристрій для дослідження займистості твердих горючих речовин та матеріалів з використанням електронагрівального елемента;

- провести експериментальні дослідження з виявленням впливу чинників на показники пожежної небезпеки хвої соснових молодняків у лабораторних і польових умовах;

- провести експериментальні дослідження з виявленням впливу чинників на процеси виникнення та поширення горіння в молодих соснових насадженнях;

- провести математичне моделювання процесів займання хвої сосни звичайної та оцінити ймовірність виникнення лісової пожежі в соснових молодняках;

- провести комп'ютерне моделювання процесів виникнення та поширення пожеж соснових молодняків і за його результатами удосконалити, а також апробувати методологію та методику оцінювання їх пожежної небезпеки.

Об'єкт досліджень – процеси формування пожежної небезпеки соснових молодняків лісового фонду України.

Предмет досліджень – вплив чинників на пожежну небезпеку соснових молодняків лісового фонду України.

Методи дослідження. В роботі було використано комплексний метод дослідження, який включав аналіз і узагальнення науково-технічних досягнень з питань сучасного стану забезпечення пожежної безпеки лісових насаджень лісового фонду України; метод діелькометрії для визначення вологості хвої соснових насаджень; метод визначення масового вмісту органічної рідини – продукту піролізу хвої соснових насаджень; метод визначення масової швидкості вигорання хвої соснових насаджень; методи визначення температури займання та проміжку часу до виникнення займання хвої соснових молодняків; метод визначення лінійної швидкості поширення пожежі соснових молодняків у польових умовах. Вологість хвої у лабораторних та польових умовах визначали діелькометричним методом з використанням цифрового вимірювача ємності та виготовленого плоского конденсатора, між пластинами якого розміщували зразки хвої. Масовий вміст органічної рідини – продукту піролізу хвої соснових насаджень оцінювали шляхом її відокремлення від маси сухого залишку піролізованої хвої та води. Для визначення температури займання хвої соснових насаджень у лабораторних та польових умовах застосовували запатентований «Пристрій для дослідження займистості горючого

матеріалу з використанням електронагрівального елемента». Комп'ютерне моделювання пожеж соснових молодняків проводили з використанням програмного забезпечення WFDS.

Для проведення експериментальних досліджень використовували метрологічно-атестоване обладнання та повірені засоби вимірювання. Математичні і статистичні методи обробки результатів досліджень здійснювали із використанням програмного забезпечення Microsoft Office Excel та Mathcad.

Наукова новизна одержаних результатів – полягає у розкритті особливостей впливу чинників на пожежну небезпеку соснових молодняків лісового фонду України як наукове підґрунтя підвищення ефективності забезпечення їх пожежної безпеки. При цьому:

– *уперше* виявлено, що швидкість вигорання зразків хвої зростає в ряду свіжозірвана – опала – висушена і на 60 с вигорання відрізняється в 1,3 рази для висушеної хвої порівняно зі значенням для свіжозірваної та корелює із зменшенням їх вологості;

– *уперше* встановлено, що залежність температури займання ($t, ^\circ\text{C}$) хвої соснових молодняків від її вологості $W, \%$ описується формулою $t = -0,002W^2 + 0,8466W + 204,49$;

набуло подальшого розвитку:

– застосування методу дієлькометрії для визначення вологості хвої соснових молодняків як чинника впливу на показники її пожежної небезпеки;

– застосування комп'ютерної моделі WFDS для визначення лінійних швидкостей розповсюдження пожежі в соснових молодняках;

– методи математичного моделювання процесів займання хвої сосни звичайної;

– *удосконалено* шкалу оцінки природної пожежної небезпеки земельних ділянок лісового фонду, у якій на відміну від регламентованої «Правилами пожежної безпеки в лісах України» обґрунтовано та запропоновано для соснових молодняків І класу небезпеки введення двох підкласів: Іа – для насаджень віком до 20 років, Іб –

для насаджень від 20 до 40 років, що сприятиме підвищенню ефективності забезпечення пожежної безпеки в молодих соснових лісах України.

Практичне значення отриманих результатів полягає в удосконаленні методології оцінювання пожежної небезпеки компонентів лісу шляхом використання запропонованої шкали оцінки природної пожежної небезпеки земельних ділянок лісового фонду України, яку впроваджено в діяльність «ДП Рава-Руське лісове господарство», застосуванні в діяльності «ДЛГП Галсільліс» розробленого пристрою для визначення займистості горючих матеріалів з використанням електронагрівального елемента, а також використанні отриманих результатів під час викладання навчальних дисциплін «Небезпечні природні процеси» і «Лісова пірологія» у Львівському державному університеті безпеки життєдіяльності, про що складено відповідні акти (додаток Д).

Особистий внесок здобувача полягає в самостійному аналізі літературних джерел, формулюванні мети і завдань досліджень, обґрунтуванні методології та виборі методик, проведенні лабораторних та польових досліджень, їх плануванні із застосуванням математичного і комп'ютерного моделювання, а також формулюванні висновків. Особистий внесок у наукових працях, опублікованих за співавторства, відображено в авторефераті та анотації дисертації, зокрема:

[45], [51–52], [97] – здобувач провів аналіз літературних джерел пожежної небезпеки соснових насаджень у молодому віці, виявлення шляхів підвищення ефективності забезпечення пожежної безпеки в молодих соснових лісах України, а також експериментально дослідив виявлення впливу чинників на показники пожежної небезпеки хвої з ділянок молодих соснових насаджень у лабораторних і польових умовах.

[46], [99], [102] – проведення експериментальних досліджень з виявлення впливу чинників на процеси виникнення та поширення горіння в молодих соснових насадженнях, математичне та комп'ютерне моделювання, удосконалення шкали оцінки природної пожежної небезпеки земельних ділянок лісового фонду України для соснових молодняків.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на 8 всеукраїнських та міжнародних науково-практичних та науково-технічних конференціях, зокрема:

- 16 Всеукраїнській науково-практичній «Конференції Рятувальників» – 2014 (м. Київ, 2014 р.);
- Всеукраїнській науково-практичній конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист» – (м. Черкаси, 2015 р.);
- Міжнародній науково-практичній «Чрезвычайные ситуации: теория, практика, инновации ЧС – 2016» – (м. Гомель, 2016 р.);
- VII Міжнародній науково-практичній конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій» – (м. Черкаси, 2016 р.);
- XIV Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми екологічної безпеки» – (м. Кременчук, 2016 р.);
- Міжнародній науково-практичній конференції «Пожежна та техногенна безпека. Теорія, практика, інновації» – (м. Львів, 2016 р.);
- VIII Міжнародній науково-практичній конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій» – (м. Черкаси, 2017 р.);
- 19 Всеукраїнській науково-практичній конференції «Технології захисту/ПожТех – 2017» (м. Київ, 2017 р.).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковано у 16 наукових працях, з яких 7 – у фахових виданнях (з них 1 (одна) у закордонному виданні), 8 – у збірниках матеріалів та тез науково-технічних та науково-практичних конференцій. Отримано 1 патент України на корисну модель.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з титульного аркуша, анотації, змісту, переліку умовних скорочень, вступу, 5-ти розділів, висновків, списку використаних джерел із 146 найменувань на 13 сторінках; 4 додатки на 20 сторінках. Основна частина дисертації займає 127 сторінок та містить 65 рисунків і 35 таблиць. Загальний обсяг роботи – 181 сторінка.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СТАТИСТИКИ ЛІСОВИХ ПОЖЕЖ ТА СУЧАСНОГО СТАНУ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ ЗЕМЕЛЬНИХ ДІЛЯНОК СОСНОВИХ НАСАДЖЕНЬ ЛІСОВОГО ФОНДУ УКРАЇНИ

Ліси України характеризуються великою кількістю порід дерев, як хвойних, так і листяних [108]. В цілому налічується понад 30 видів чистих і мішаних деревостанів, серед яких переважають сосна звичайна, дуб звичайний, бук лісовий, ялиця звичайна, береза повисла, граб звичайний, ялиця біла [10]. Хвойні насадження займають 42% загальної площі лісів, зокрема сосна – 33%, а твердолистяні насадження – 43%, в тому числі дуб і бук – 32%. Середня лісистість загалом для України становить 15,9% [24]. Ліси України зростають в зонах змішаних лісів, лісостепу та степу [96]. До окремої «природної лісової автономії» належать Українські Карпати. Назви, особливості природних зон та їхнє розташування на території України наведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Природні зони в Україні та їх характеристика (на основі) [10], [24], [96] та [108]

Назва природної зони	Характеристика	Територіальне розташування
1	2	3
Українське Полісся	Зона змішаних лісів. Займає північну частину України. Клімат – помірно континентальний, літо тепле, вологе. Весна прохолодна. В середньому щороку в випадає 600-680 мм. опадів. Завдяки значній кількості опадів річки Полісся є повноводними. Навесні, під час танення снігів, бувають тривалі повені. З лісів переважають соснові (бори), дубово-соснові та дубово-грабові. Верхній ярус утворюють дерева. Середній ярус (підліском) складають кущі. Нижній – трав'янисті рослини. У північній частині зони мішаних лісів із хвойних дерев переважає сосна звичайна, а з листяних – дуб звичайний. Лісову підстилку утворюють опале листя, хвоя і сухі рослини.	Північна частина України

Продовження табл. 1.1

1	2	3
Лісостеп	Зона, де зосереджені ділянки лісу і степу. Простягається від Прикарпаття до Середньоросійської височини. Клімат – помірно континентальний. Літо – тепле, зима – помірно холодна. На заході випадає 550-750 мм, на сході - 450 мм опадів на рік. В Лісостепу зосереджені ділянки листяних лісів. Погода дощова. Переважають штучні лісові масиви.	Центральна частина України
Українські Карпати	Характеризуються випаданням найбільшої кількості опадів: дощів – навесні і влітку, снігу – взимку. Біля підніжжя і на схилах гір ростуть листяні ліси. Їх утворюють дуб, граб, липа, клен, бук. З підвищенням висоти гір, повітря стає холодніше, кількість листяних дерев зменшується, зростають хвойні дерева: ялиця і смерека. Високо в горах ліс стає хвойним. Крім ялини та ялиці в ньому росте модрина. Хвойний ліс – темний і вологий.	Південно-західна частина України

Особливостями лісів та лісового господарства України є [24]:

- відносно низький середній рівень лісистості території України;
- ліси зростають у різних природних зонах (Полісся, Лісостеп, Степ, Українські Карпати), які характеризується істотними відмінностями щодо лісорослинних умов, а отже і методів ведення лісового господарства;
- хвойні типи переважають на півночі країни і в Карпатах, листяні – в центрі та південній частині України;
- історично склалася ситуація, внаслідок якої окремі ліси перейшли у приватну власність постійних лісокористувачів (для ведення лісового господарства ліси передано для постійного використання більше п'ятдесяти підприємствам, організаціям та відомствам);
- загалом в Україні спостерігається стійка тенденція щодо збільшення природоохоронних територій;
- велика площа лісів зосереджена у зоні радіоактивного забруднення;
- близько 50% від загальної кількості лісів України є штучно створеними та потребують посиленого догляду.

Поряд з веденням господарської діяльності значної уваги потребує дотримання заходів пожежної безпеки, контроль за виконанням яких потрібно здійснювати насамперед у хвойних насадженнях, зокрема сосни звичайної, яка є найбільш поширеною серед хвойних типів дерев практично у всіх кліматичних зонах. Пожежі у таких лісах виникають часто, їх гасіння є складними і тривалими [64]. Тому важливим завданням підрозділів лісових господарств є підвищення ефективності забезпечення пожежної безпеки соснових насаджень.

1.1. Аналіз світової та національної статистики лісових пожеж

Проблема лісових пожеж в умовах сьогодення набула значних масштабів. Вони виникають навіть у таких високорозвинутих країнах, як США, Австралія, а також країни Європи. Статистичні дані, що стосуються лісових пожеж, ведуться в більшості країн, проте офіційна статистика у світі не завжди відображає реальний стан речей. Статистику лісових пожеж та причини їх виникнення в США наведено в [133], [144]. Щороку через сухий клімат виникає велика кількість лісових пожеж у країнах Південної Європи, зокрема Іспанії, Португалії, Греції, Італії тощо [114] (рис. 1.1).

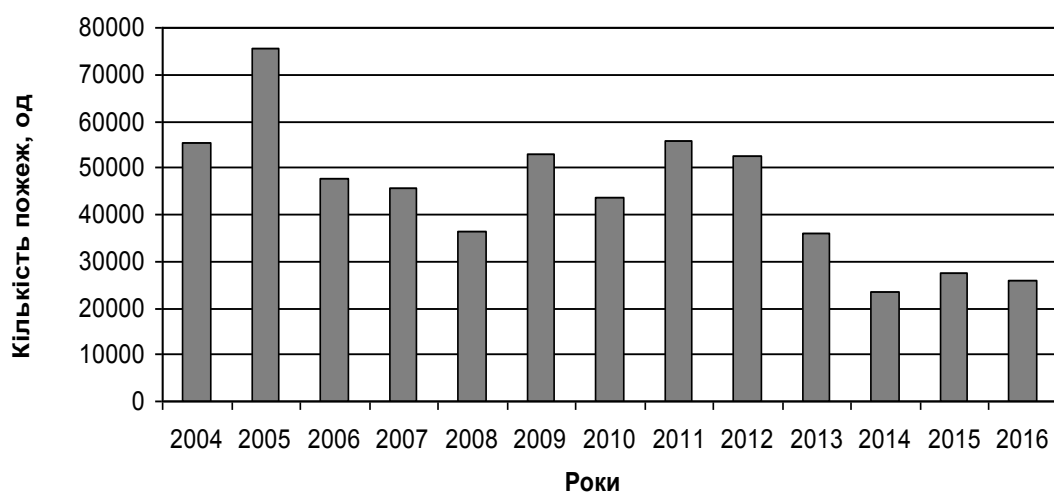


Рисунок 1.1– Щорічна кількість лісових пожеж у країнах Південної Європи у 2004–2016 рр. за [114]

Значна щорічна кількість лісових пожеж властива й країнам Центральної та Західної Європи, зокрема Німеччині, Франції, Польщі та ін. [114] (рис 1.2).

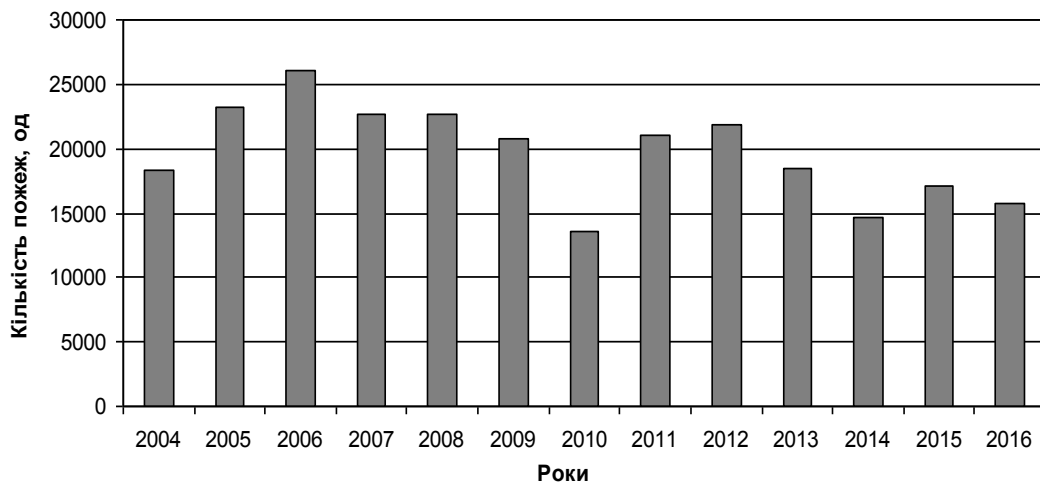


Рисунок 1.2 – Щорічна кількість лісових пожеж в країнах Центральної та Західної Європи у 2004–2016 рр. за [114]

Особливо велика кількість пожеж в південноєвропейських країнах виникла в 2004–2005 рр., після чого спостерігалась тенденція до спадання. Проте, порівняно з країнами Центральної та Західної Європи цей показник загальної кількості пожеж, зокрема у 2005 р., є в 2–3 рази вищим і сягає значення майже 75 тис. випадків загорянь.

Значних масштабів набули лісові пожежі в Австралії, особливо у 2014–2016 рр., призвівши до ураження вогнем великих площ. Висока температура повітря, значення якої сягало місцями 42,6 °С, спричинила протягом усього 2014 року і в перші 6 місяців 2015 року 18 лісових пожеж, внаслідок чого сильних пошкоджень вогнем зазнали південна, західна та центральна частини материка [116–117] (табл.1.2)

Таблиця 1.2

Площа пошкодженої вогнем території в Австралії за 2014–2016 рр. за [116–117]

Назва штату	Площа пошкодженої вогнем території, га
1	2
Західна Австралія	225348
Південна Австралія	216012
Вікторія	21076

Продовження табл. 1.2

1	2
Новий Південний Уельс	26500
Північна Австралія	15700

В Україні щодо виникнення лісових пожеж спостерігається подібна тенденція. Впродовж 2003-2016 рр. згідно з даними Державного агентства лісових ресурсів України виникло 47753 лісових пожеж, у тому числі й пожеж у соснових молодняках [104]. Статистика виникнення лісових пожеж на території України наведена на рис. 1.3.

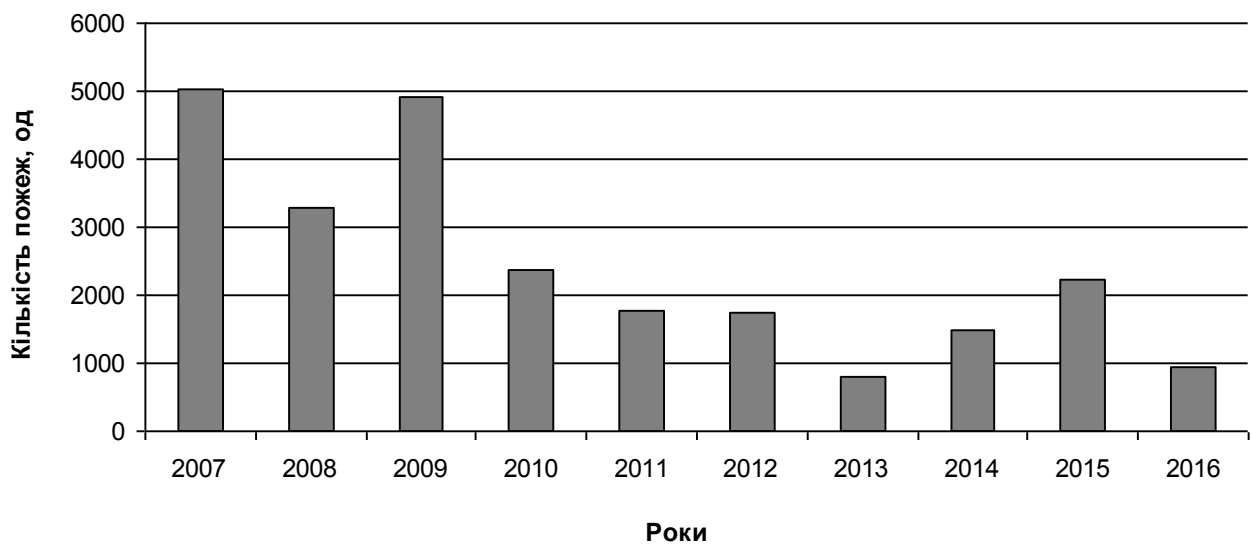


Рисунок 1.3 – Кількість лісових пожеж у лісах Державного агентства лісових ресурсів України у 2007–2016 рр. за [72–73], [94], [104]

Найбільше пожеж виникло за цей період у 2007 і 2009 рр., а найменше – у 2004, 2013 та 2016 роках [15], [23]. Підвищена температура атмосферного повітря та тривала відсутність опадів, які спостерігалися в роки з найбільшою кількістю пожеж, є основними чинниками впливу на виникнення лісових пожеж. Серед загальної кількості лісових пожеж слід виділити і такі, що розповсюджуються на великі площі, що перевищують 5000 м² (рис. 1.4).

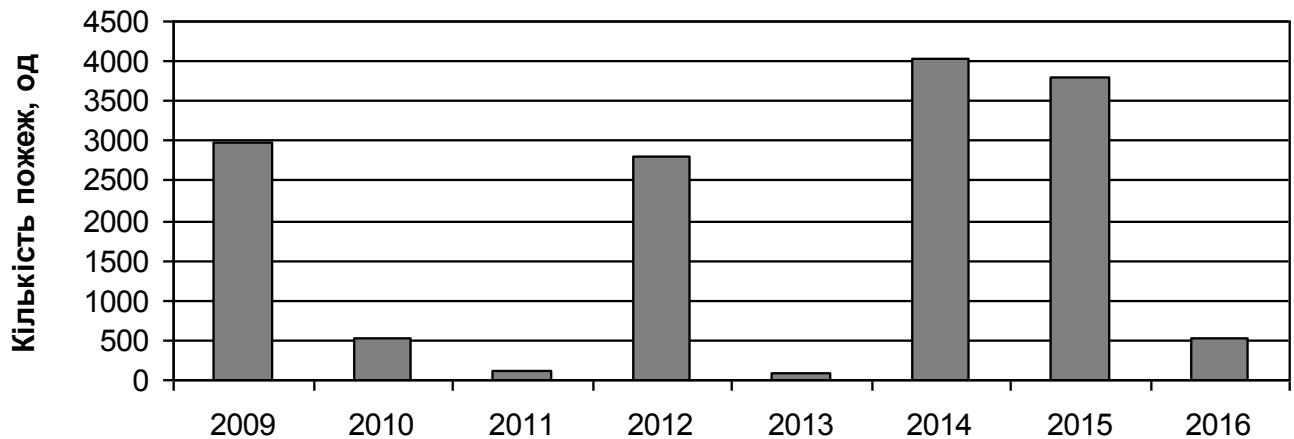


Рисунок 1.4 – Кількість лісових пожеж у лісах Державного агентства Лісових ресурсів України, що розповсюдились на площу понад 5 га у 2009-2016 рр. за [23–24]

Найбільше таких пожеж спостерігалось у 2009, 2012, 2014 і 2015 рр.

Значна кількість лісових пожеж, які охоплювали великі площі, виникла впродовж 2014-2015 рр., зокрема на території Луганської обл., що пояснюється проведенням антитерористичної операції (АТО) в цій місцевості. Значна кількість лісових пожеж виникла і впродовж 2015 року [2], збитки внаслідок яких сягають понад 20 млн. грн. [104] (табл. 1.3).

Таблиця 1.3

Лісові пожежі в Україні за регіонами у 2015 році [104]

Регіон (області)	Кількість лісових пожеж, од	Площа лісових земель, пройдена пожежами, га	Збитки, заподіяні лісовими пожежами (у фактичних цінах), тис. грн		
			Усього	У тому числі вартість	
				Згорілого лісу	Заготовленої лісової продукції та інших матеріальних цінностей
1	2	3	4	5	6
Вінницька	2	5	92	—	92

Продовження табл. 1.3

1	2	3	4	5	6
Волинська	97	214	1093,7	60	1033,7
Дніпропетровська	231	144	113	0,1	112,9
Донецька	101	32	132,3	6	126,3
Житомирська	284	132	1260,6	0,7	1259,9
Закарпатська	17	22	1482,2	1396,6	85,6
Запорізька	31	33	94,7	10	84,7
Івано-Франківська	8	8	94,8	91,2	3,6
Київська	567	11211	3045,6	—	3045,6
Кіровоградська	4	2	1,7	—	1,7
Луганська	353	1101	3170,6	270,7	2899,9
Львівська	30	189	1611,4	743,1	868,3
Миколаївська	48	40	151,9	28	123,9
Одеська	5	6	2,3	—	2,3
Полтавська	29	29	52,5	—	52,5
Рівненська	80	143	308,4	145,6	162,8
Сумська	231	192	165,9	—	165,9
Тернопільська	5	7	126,9	51,2	75,7
Харківська	192	87	215,3	—	215,3
Херсонська	199	41	345,7	1,5	344,2
Хмельницька	52	472	1357,2	1149,9	207,3
Черкаська	78	19	117,2	—	117,2
Чернівецька	3	1	88,3	87,2	1,1
Чернігівська	194	410	1479	779,3	699,7
м. Київ	972	152	3561,3	533,8	3027,5
Всього	3813	14691	20164,5	5354,9	14809,6

Протягом останніх років збільшилась кількість виникнення лісових пожеж хвойних молодняків [83]. Згідно з даними Державного агентства лісових ресурсів України, найбільш потенційно небезпечними об'єктами з огляду на лісові пожежі є саме молоді хвойні насадження [51], поширені здебільшого на Поліссі, Сході та Півдні України. Розосереджені вони переважно в таких областях, як Житомирська, Харківська, Чернігівська, Луганська, Херсонська та АР Крим [72–73] (рис. 1.5).

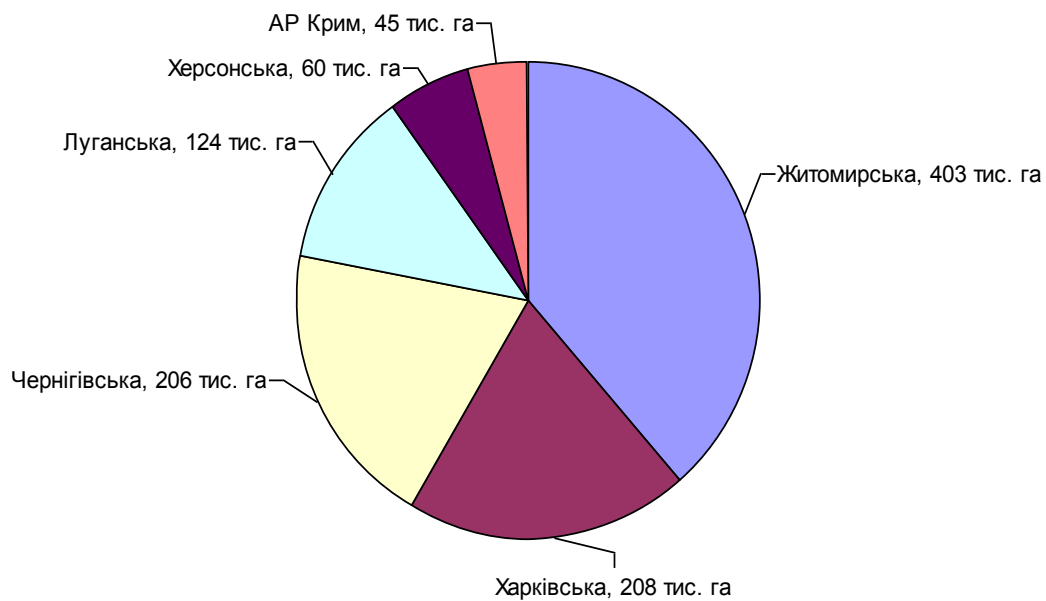


Рисунок 1.5 – Території України з найбільшими площами молодих хвойних насаджень за [72–73]

У звітах ДСНС України, Державного агентства лісових ресурсів України, а також ЗМІ, наведено приклади масштабних пожеж у хвойних молодняках.

У вересні 2015 року в лісовому масиві ДП «Лубенське військово-лісництво» (Полтавська обл.) сталася пожежа, де вогнем знищено 3 га лісової підстилки та молоді насадження сосни. В гасінні приймали участь: 1 відділення ДПРЧ-1, 1 відділення ДПРЧ-2, 1 відділення ДПРЧ-3, 1 відділення ДПРЧ-4, 1 відділення АРЧ, АЦ-15 АРЗ СП, 1 АЦ та 1 трактор ДП «Полтавський лісгосп» [13].

27 квітня 2016 року біля селища Берегомет Вижницького району Чернівецької обл. на території місцевого лісопромислового господарства були виявлені осередки пожежі в молодому хвойному лісі [68].

У квітні 2015 року поблизу с. Понінка Полонського району Хмельницької обл. у лісовому масиві ДП «Шепетівське лісове господарство» виникла пожежа, внаслідок якої горів хвойний ліс окремими осередками на площі

9,2 га. Пожежу вдалося ліквідувати силами підрозділів ОРС ЦЗ Хмельниччини [14].

У серпні 2015 року в с. Самгородок Козятинського р-ну Вінницької обл. на відкритій території виникла пожежа сухої трави. До місця пожежі прибули відділення ДПРЧ-11 м. Козятин, а також МПК с. Самгородок. Після прибуття на місце події, рятувальниками встановлено, що на площі приблизно 1 га. горить суха трава. Згодом вогонь перекинувся на насадження сосни звичайної Козятинського райагролісу на площі 0,7 га. Вогнем знищено 1 гектар сухої трави та 150 саджанців соснового молодняка на площі 400 квадратних метрів, пошкоджено 100 саджанців на площі 300 квадратних метрів; прямий матеріальний збиток від пожежі склав 40 тисяч гривень. Внаслідок ефективних дій підрозділу врятовано матеріальних цінностей на суму 200 тис. гривень [69].



Рисунок 1.6 – Згорілі соснові
насадження на території
Козятинського району,
(2015 рік), [69]



Рисунок 1.7 – Підстилка
соснових
молодняків, пошкоджена
пожежею (2015 рік), [69]

Близько 35 гектарів молодого хвойного лісу внаслідок пожежі згоріло 11 серпня 2013 року біля селища Троїцьке в Попаснянському районі Луганської обл., а 5 липня 2015 року біля населених пунктів Піонерське та

Миколаївка Луганської обл. внаслідок дій АТО вогнем пошкоджено близько 15 га соснового лісу Станично-Луганського лісництва [70].

Відомі приклади пожеж у хвойних молодняках й у сусідніх країнах світу. Зокрема масштабна лісова пожежа виникла 10 серпня 1992 року в лісництві Солець Куявських (Республіка Польща), яка тривала 2 дні і призвела до пошкодження 3000 га молодого хвойного лісу [138], [140].

Особливу небезпеку становлять випадки виникнення та поширення пожеж в лісових насадженнях поблизу місць розташування сміттєзвалищ та полігонів твердих побутових відходів [85], а також об'єктів зберігання зброї та боєприпасів.

Аналіз статистики виникнення лісових пожеж свідчить, що незважаючи на високий рівень заходів пожежної профілактики, неконтрольовані процеси виникнення й поширення пожеж мають місце щорічно не лише у лісах України, але й країн з високим розвитком економічного розвитку. А потенційним джерелом підвищеної небезпеки виникнення і поширення пожеж є молоді хвойні ліси.

1.2. Особливості виникнення і поширення горіння у середовищі соснових насаджень

Основними характеристиками лісової пожежі, зумовленими процесами горіння, є її вид (низова, верхова, суцільна), лінійна швидкість поширення, висота полум'я, площа та периметр.

Лісові пожежі за інтенсивністю горіння поділяються на слабкі, середні та сильні [3], [61]. Пожежі зумовлюються сукупністю чинників, таких як температура, відносна вологість повітря, атмосферний тиск, напрямок та швидкість вітру, вік, вміст кисню в повітрі досліджуваної місцевості, експозиція, структура та породний склад дерев, рослини наземного ярусу, запас та вологість лісової підстилки та ін. [37]. Досліджували лісові пожежі вітчизняні та зарубіжні вчені, такі як І. С. Мелехов [59-64], В. Г. Нестеров [74],

Н. П. Курбатський [54-55], R. C. Rothermel [6], W. H. Frandsen [119], Van Wagner [142] ті ін. Але окремих досліджень, присвячених проблематиці пожеж молодих соснових насаджень, незважаючи на їх високу пожежну небезпеку, на теперішній час не достатньо, що зумовлює актуальність роботи.

В цілому залежність лісової пожежі від основних факторів впливу можна подати у вигляді такої схеми (рис.1.8) [11].

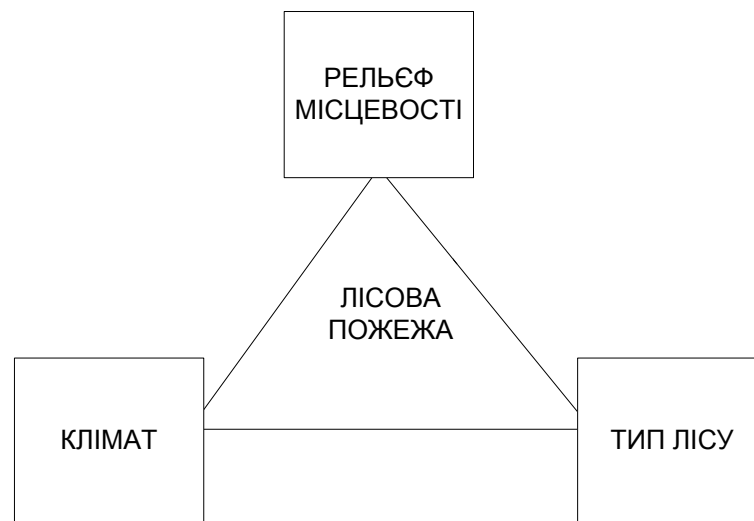
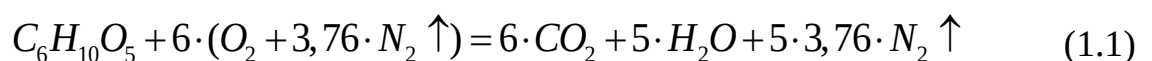


Рисунок 1.8 – Вплив умов довкілля на виникнення лісової пожежі

Інтенсивність горіння лісу залежить від його типу [8], [64]. Процеси горіння у лісі є гетерогенними, тому що відбуваються у відкритій атмосфері. Як відомо, деревина горить в середовищі окисника [1], [4]. В атмосфері лісу вміст кисню достатньо великий, що сприяє процесам горіння в цілому. Основу лісових горючих матеріалів складає целюлоза ($C_6H_{10}O_5$), яка здатна горіти в атмосфері окисника [36], [75]. Окрім цього, деревина містить близько 42 % окисену, що підсилює процеси горіння [21], [36]. Горіння целюлози в атмосфері описується формулою



Внаслідок згоряння деревини в атмосфері утворюється велика кількість вуглекислого газу, а також водяна пара. Деревина, залежно від умов контакту з повітряним середовищем, окислюється з врахуванням певного фазового порядку, за якого відбувається зміна температури. Е. С. Арцибашев і Г. А. Амосов розкрили сутність горіння як системи складних фізико-хімічних перетворень [89], зокрема виділяють 5 фаз горіння деревини. Температура на окремих фазах горіння [3] наведена в табл. 1.4.

Таблиця 1.4

Розподіл температурного режиму підігріву деревини для різних фаз горіння за [3]

Фаза горіння	Температурний режим, °C	Процеси, які спостерігаються
1	0–100	Нагрівання деревини
2	100–150	Висушування деревини
3	150–300	Піроліз деревини
4	300–500	Перехід від горіння до затухання
5	500–1000	Виділення CO та CO ₂

Процес горіння хвойних молодняків у порівнянні з іншими типами лісових насаджень має деякі особливості, що, насамперед, пояснюється специфікою фізичних та хімічних властивостей [75], [141]. Стрункість та прямолінійна форма більшості таких дерев спричинена порядком розташування волокон [36]. Наявність смоляних ходів зумовлює накопичення та поширення смоли вздовж стовбура дерева. Смола захищає дерево від деструкції, проте посилює його горючі властивості. Вміст смоли є найбільшим у кореневій системі та нижній частині дерева, а також і у хвої. Також у хвойних деревах міститься скипидар та каніфоль, котрі є активними компонентами в процесі горіння. Молоді хвойні породи (табл. 1.5) містять достатньо багато живиці (суміші усіх вище взятих речовин) [32], [86], [146].

Вміст живиці у дереві та його компонентах зумовлюють їх теплотворну здатність [31]. Зауважимо, що теплотворна здатність під час горіння сухого матеріалу є вищою ($Q_{\text{с}}$), а вологого – нижчою ($Q_{\text{н}}$). Тепло, яке виділяється при

згорянні матеріалу, частково спрямовується на підсушування нових порцій горючого матеріалу та зумовлює швидкість поширення полум'я. Важливе значення має і структура горючого матеріалу, наприклад його геометричні розміри та розташування. Наприклад, гілки сосни звичайної віком до 10 років, майже повністю вкриті хвою. А молода хвоя сосни, згідно з теорією Г. А. Амосова [64], має найвищу теплотворну здатність серед усіх видів горючого лісового матеріалу. Окрім того, хвоя швидко займається через малу товщину. Проте під час лісової пожежі горить не лише хвоя, але й інші компоненти дерева (гілки, стовбур), а також інші рослини та їх рештки, що впливає на величину теплотворної здатності. Саме значення сумарної теплотворної здатності дає змогу прогнозувати поведінку лісової пожежі, за якою проводять розрахунок сил і засобів, котрі залучатимуться для її гасіння.

Таблиця 1.5

Вміст живиці у деревах деяких хвойних порід за [32]

Вид дерева	Вміст живиці, %
Ялиця	1,00
Ялина	1,68
Модрина	4,19
Сосна	4,81

Структура та запас горючого матеріалу у складі пожежонебезпечного середовища – це лише один з аспектів пожежної безпеки лісу. На виникнення і поширення пожеж впливають також і умови клімату: температура навколишнього середовища, вологість атмосферного повітря, кількість опадів, атмосферний тиск.

Важливе значення для виникнення пожеж у лісі має вологість повітря [55]. Вважають, що із збільшенням вологості зменшується загроза виникнення пожежі, а вологість повітря менша за 40% зумовлює підвищену пожежну небезпеку [51]. Вологість повітря істотно впливає на вологість лісової підстилки, яка і зумовлює ступінь пожежної безпеки. W. R. Stevens встановив залежність пожежної безпеки лісу від вологості верхнього шару лісової підстилки [136] (табл.1.6).

Таблиця 1.6

Залежність пожежної небезпеки від вологості верхнього шару лісової підстилки за [136]

Вологість верхнього шару підстилки, %	Причина загоряння	Ступінь пожежної небезпеки
До 6	Цигарки, іскри, жар з люльки	Найвищий
6-10	Іскри, жар з люльки, сірники, багаття	Високий
11-16	Жар з люльки, сірники, багаття	Середній
17-22	Сірники, багаття	Малий
23-29	Сірники, багаття (повільне запалювання)	Дуже низький
≥ 29	Пожежа відсутня	Відсутній

В. Г. Нестеров розробив методику [74], згідно з якою клас пожежної небезпеки у лісі визначається з урахуванням значень запропонованого ним комплексного показника K , який визначається за формулою (1.2):

$$K = \sum_1^n t^o - (t^o - \alpha), \quad (1.2)$$

де: t^o – температура повітря; α – температура точки роси в 12 (13 г) за місцевим часом; n – кількість днів після дощу, включаючи останній день опадів. м, що характеризує пожежну небезпеку у лісі [74], [35]. З урахуванням цього показника Нестеровим запропоновано шкалу визначення пожежної небезпеки у лісі за умовами погоди, яку наведено в табл. 1.7

Таблиця 1.7

Визначення пожежної небезпеки в лісі за умовами погоди за [74]

Клас пожежної небезпеки	Пожежна небезпека	Комплексний показник
I	Немає	<300
II	Незначна	301 – 1000
III	Середня	1001 – 4000
IV	Висока	4001 – 10000
V	Надзвичайна	10000 – 12000

Для соснових насаджень найбільшою є вологість посередині між деревами, що пояснюється наявністю вільного простору між кронами та проникненням опадів [60]. Низькою є вологість безпосередньо біля стовбура, оскільки окрім затримування опадів коренева система вбирає вологу.

Якщо вологість повітря незначна, тоді відбувається активна аерація шару лісової підстилки, а це сприяє виникненню пожежі та її швидкому розповсюдженню [137]. Небезпека для молодого хвойного лісу полягає в тому, що процес горіння зумовлює виникнення потужних конвективних потоків, під дією яких відбувається перенесення розігрітих летючих часточок на значну відстань з їх потраплянням на гілки дерев. Поширення відбувається більш сухими ділянками, минаючи вологі, для займання яких необхідні більші витрати тепла на висушування та підігрів зволжених горючих матеріалів.

На можливість виникнення та розвиток пожежі мають вплив і лісорослинні умови та рельєф місцевості. Молоді хвойні насадження найчастіше зростають на піщаних ґрунтах, рідше на глинистих та болотистих [92]. Слід зазначити, що їх ріст, а також відновлення часто відбувається на ділянках після пожеж – згарищах [81]. Це пояснюється багатьма причинами, зокрема, регенерацією ґрунтів після горіння, їх збагаченням мінеральними продуктами горіння. Лісовий масив може зростати на рівнинній та гірській місцевості.

Вирішальним фактором розповсюдження пожежі є вітер. Вплив вітру на лісову пожежу неоднозначний. Вітер має властивість добової мінливості (зміни напрямку). Залежно від швидкості він може сприяти поширенню пожежі, або її сповільнювати, охолоджувати горючий матеріал. З настанням весни частішають випадки випалювання трав. Не дотримуючись норм чинного законодавства, жителі сільських населених пунктів здійснюють умисний підпал трави з господарською метою, не замислюючись про наслідки. Якщо фронт полум'я наближається до межі лісу, а з боку населення не вжито запобіжних заходів, вогонь може спричинити лісову пожежу. Хоча для лісу у будь-якому віці існує загроза пожежі, саме для хвойних молодняків у більшості випадків

займання від трав'яної пожежі не уникнути. Під дією вітру лісова пожежа, згідно з класифікацією М. П. Курбатського [54, 55], з низової перейде у верхову.

Зауважимо, що на небезпеку виникнення пожеж у молодих соснових насадженнях впливають й інші природні та антропогенні чинники, внаслідок яких відбувається займання лісу. Одним з таких чинників є розташування об'єктів, де виготовляються, зберігаються чи експлуатуються небезпечні хімічні речовини, зокрема і вибухонебезпечні. Виникнення пожеж на таких об'єктах становить загрозу для виникнення й поширення неконтрольованих процесів горіння й поширення лісових пожеж.

Акцентуючи увагу на дослідженні взаємозв'язку між вмістом горючих речовин та теплотворною здатністю молодих хвойних насаджень, а також впливом різноманітних чинників на процеси горіння в середовищі хвойних молодняків, дослідження їх пожежонебезпеки повинно базуватись на таких самостійних завданнях [51]:

- вивчення структури хвойних порід дерев та їх властивостей;
- визначення вмісту органічних речовин у хвої;
- дослідження структури насадження та просторового розподілу;
- дослідження процесів поширення пожеж у лісах.

1.3. Моделювання лісових пожеж

Лісові пожежі – явище природного характеру [87], надзвичайно небезпечне та згубне. Їх дослідження є складним і небезпечним, оскільки основним завданням у разі виникнення є пожежогасіння. Проведення експерименту в реальних умовах практикують дуже рідко через загрозу втрати контролю над вогнем. Тому найбільш актуальними є дослідження лісових пожеж методами моделювання, які в умовах сьогодення дають змогу безпечно прогнозувати поведінку пожежі в лісовому середовищі та визначати її основні параметри.

Моделювання лісових пожеж проводили багато вчених. Серед моделей лісових пожеж найпоширенішими є математичні (емпіричні), фізичні (детерміновані) та комп'ютерні. В основі емпіричних моделей покладені залежності, отримані експериментальними методами [105], [119], [124]. Такі моделі лісових пожеж умовно можна поділити на 3 рівні [17–18]:

- моделювання фізико-хімічних процесів горіння ЛГМ;
- моделювання розповсюдження і розвитку пожеж з прогнозуванням їх контурів і ряду характеристик, необхідних для організації гасіння пожеж;
- моделювання пожеж як подій в системі охорони лісу (стратегічне моделювання).

Детерміновані моделі задають рівняннями математичної фізики. Вони описують окремі процеси, які відбуваються в умовах пожежі, а саме процеси перенесення енергії із зони горіння до незгорілих рослинних горючих матеріалів [105]. На теперішній час розроблено велику кількість комп'ютерних моделей. Зокрема в [12] для побудови моделі поширення лісової пожежі використано метод триангуляції Делоне, згідно з яким область моделювання поділяли на комірки з урахуванням значень ландшафту та лісового покриву. В [106] створено тривимірну модель лісової ділянки з осередком загоряння з використанням Grid-обчислень. Це моделі, отримані внаслідок процесів симуляції в комп'ютерному програмному середовищі.

W. H. Frandsen [119] дослідив математичну модель розповсюдження фронту пожежі, яка характеризується відношенням енергії, необхідної для займання, до одиниці об'єму горючого матеріалу. Розповсюдження пожеж кронами дерев досліджував Van Wagner [142–143], поділивши їх на три типи: пасивну, активну та незалежну, зокрема акцентувавши, що незалежні пожежі крон є короткотривалими і виникають рідко. Модель розповсюдження полум'я горючими матеріалами на горизонтальних поверхнях запропонував R. C. Rothermel [6], [134], дослідивши її для 11 видів лісових горючих матеріалів, зокрема низької та високої трав, кущів та чагарників, лісової хвойної підстилки, лісової підстилки включно з опалими гілками і сухими залишками рослинності,

підстилки листяних лісів, повалених або окремо розташованих дерев тощо. Подібні дослідження провів D. H. Anderson [112], враховуючи навантаження та вологість трав, кущів, лісової підстилки. F. A. Albin [120] доповнити 11 моделей горючих матеріалів Rothermel запропонував ще двома: сухими лісовими кущами та чагарниками. Г. А. Доррер [25–27] запропонував методику моделювання динаміки лісових пожеж на основі нейромережових технологій та даних прогнозування параметрів лісових пожеж [26]. А. М. Гришиним досліджено закономірності тепломасообміну, займання та горіння частин наземного шару рослинних матеріалів та встановлено, що в залежності від початкової температури горючих часток та швидкості вітру спостерігаються 3 режими: відсутність займання, займання та відсутність затухання [17–18]. За результатами математичного моделювання пожежі соснових насаджень встановлено, що перехід з низової у верхову форму відбувається за нижньої висоти крон від рівня землі близько 0,7 м за умови питомого тепловиділення не менше ніж 2600 кДж/м^2 [17]. С. А. Полосинов [84] проводив моделювання розповсюдження лісової пожежі та її локалізації з залученням засобів авіації, дослідивши комплексний взаємозв'язок характеристик пожежі та літального апарата. О. А. Тарасенко розробив стохастичну модель пірологічної характеристики шару ЛГМ у вигляді випадкової функції з відомим математичним сподіванням і кореляційною функцією, параметри якої визначаються ступенем неоднорідності характеристик шару ЛГМ [95]. Також він побудував математичні моделі інтегральних характеристик низової лісової пожежі – площі і периметра в умовах вітрового впливу. В. А. Перминов розробив модель поширення лісових пожеж з урахуванням зовнішнього поля вітру і займання лісових масивів від світлового випромінювання в результаті зіткнень з небесними тілами на прикладі метеориту [80]. Е. М. Гуліда розробив аналітичну модель поширення лісових пожеж з урахуванням теплопровідності шару підстилки та землі в межах лісового масиву, за якою визначав швидкість поширення контуру лісової пожежі [19]. А. Д. Кузик моделював процеси займання лісової підстилки, зокрема поширення пожежі в умовах рельєфу [48].

На основі моделей Anderson, Burgan, та Rothermel створено програмне забезпечення FARSITE та BehavePlus [120] для моніторингу поширення та моделювання лісових пожеж. Програмний комплекс FARSITE широко використовується в США та інших країнах для прогнозування та попередження лісових пожеж. Використовуючи BehavePlus, можна моделювати розвиток лісової пожежі у середовищі її поширення. Ці моделі базуються на емпіричних залежностях і враховують усереднені характеристики горючого матеріалу та описують процеси горіння для окремих його моделей. Позбавлені цього недоліку фізичні моделі, які є універсальними та придатними для будь-яких видів горючих матеріалів за будь-яких умов. Прикладом такої моделі є WFDS [131], [145], яка дає змогу моделювати пожежі лісових насаджень в залежності від їхнього типу, структури, віку тощо з можливістю отримання числових результатів та візуалізації процесу поширення горіння.

В Росії для моделювання природних, зокрема лісових пожеж застосовують програмні комплекси «Тайга-2», «Система планирования тушения лесных пожаров», «Система оценки природной пожарной опасности лесов», «Оценка пожарной опасности и параметров пожаров по космическим снимкам» [27]. Зокрема програмний комплекс «Тайга-2», може моделювати процеси поширення пожежі за різних умов погоди.

Вітчизняні та зарубіжні моделі, що описують лісові пожежі, є доволі складними з огляду на те, що жодна з них не дає змогу моделювати лісову пожежу, не вдаючись до будь-яких їх модифікацій, зокрема, поєднання чи взаємодії з іншими моделями, адаптацій до природних умов та місцевості тощо. Іноді моделі не достатньо точно описують процеси розповсюдження пожежі. Тому для дослідження лісових пожеж актуальним є застосування моделей, які описують фізичні процеси їх виникнення та поширення, а також дають змогу враховувати різноманітні види горючого матеріалу, тип насадження та структурно-просторові особливості лісового середовища.

1.4. Система забезпечення пожежної безпеки земельних ділянок соснових насаджень лісового фонду України

Оскільки гасіння лісових пожеж є складним та потребує значних матеріальних і людських ресурсів, удосконалення системи запобігання їх виникненню є актуальним завданням. Попередження пожеж є найбільш ефективною діяльністю щодо уникнення негативних наслідків [103]. Також це вигідно і з економічної точки зору. Запобігання лісовим пожежам має не лише на меті зниження пожежної небезпеки лісу, але й стосуватися і причин пожеж, в тому числі і підпалів. Організаційними питаннями щодо недопущення виникнення пожеж повинні займатися не лише працівники лісового господарства [24], але й природоохоронні організації, правоохоронні органи та підрозділи цивільного захисту [22], [41].

В Україні пожежна небезпека лісових насаджень визначається за Шкалою оцінки природної пожежної небезпеки земельних ділянок лісового фонду, що поділена на 5 класів (табл. 1.8). Шкала застосовується також для оцінки природної пожежної небезпеки інших земель, вкритих ліською рослинністю [88].

Таблиця 1.8

Шкала оцінювання природної пожежної небезпеки земельних ділянок лісового фонду [88]

Клас пожежної небезпеки	Об'єкт загоряння (характерні типи насаджень і умов місцезростання, категорії не вкритих ліською рослинністю і нелісових земель)	Найбільш імовірні види пожеж, умови і тривалість періоду їх можливого виникнення і розповсюдження
1	2	3
I	Насадження хвойних порід віком 40 і менше років в усіх типах умов місцезростання (ТУМ). Насадження хвойних порід старші 40 років з індексами 0 (дуже сухі), 1 (сухі). Насадження сосни	Протягом усього пожежонебезпечного періоду можливі лісові пожежі, а на ділянках з наявністю деревостану –

Продовження табл. 1.8

1	2	3
	гірської, ялівцю, туї незалежно від віку та ТУМ. Незімкнуті лісові культури усіх порід. Зруби з-під хвойних порід, згарища, загиблі насадження (вітровали, буреломи та інші). Лісові насадження з рівнем радіаційного забруднення 15 кі/кв.км і вище, незалежно від породного складу, віку і ТУМ	верхові
II	Насадження хвойних порід старші 40 років в ТУМ з індексом 2 (свіжі). Насадження листяних порід в ТУМ з індексами 0,1	Низові пожежі можливі протягом усього пожежонебезпечного періоду, верхові - в періоди пожежних максимумів
III	Насадження хвойних порід старші 40 років в ТУМ з індексами 3 (вологі), 4 (сирі). Насадження листяних порід в ТУМ з індексом 2	Низові і верхові пожежі можливі в період літнього пожежного максимуму
IV	Насадження хвойних порід старші 40 років в ТУМ з індексом 5 (мокрі). Насадження листяних порід в ТУМ з індексами 3, 4. Зруби з-під листяних порід (серед насаджень листяних порід), інші не вкриті лісовою рослинністю землі	Низові пожежі можливі тільки в періоди пожежних максимумів
V	Листяні насадження в ТУМ з індексом 5. Не вкриті лісовою рослинністю землі (лісові шляхи, просіки, візири, протипожежні розриви). Нелісові землі (крім сіножатей, пасовищ, садів, ягідників)	Виникнення пожежі можливо тільки при довгострокових посухах

Пожежна профілактика – це комплекс заходів щодо запобігання виникненню пожежі, обмеження її розповсюдження, а також створення умов для якісного пожежогасіння [30]. Основні заходи здійснення пожежної профілактики лісів передбачені відомчими нормами та правилами (наведені на

схемі (рис. 1.9). Особливої уваги заслуговують хвойні насадження віком до 40 років, де ймовірність виникнення та поширення верхових пожеж, особливо в пожежонебезпечний сезон, є дуже великою (табл. 1.7). Проте для хвойних молодняків сьогодні ще не розроблено окремих правил чи норм щодо забезпечення їх протипожежного стану.



Рисунок 1.9 – Схема основних заходів пожежної профілактики у лісах [51].

Це частково пов'язано з економічною ситуацією і вимагає впровадження нових ідей [109]. До них слід віднести:

- удосконалення системи управління протипожежною охороною лісу;
- систематизацію навчання працівників лісового господарства за напрямом пожежної безпеки;
- створення добровільних товариств охорони лісу;
- районування території лісового фонду за рівнем протипожежної охорони з урахуванням економічної та екологічної цінності лісів, а також ступеня господарського освоєння територій;
- проведення комплексної профілактики лісових пожеж за рахунок збільшення обсягу робіт з протипожежного влаштування територій,

розширення мережі пожежних пунктів спостереження і влаштування пожежно-хімічних станцій;

- удосконалення лісових пожежних станцій;
- створення резерву фінансових коштів і матеріальних ресурсів з метою оперативного реагування на надзвичайні ситуації з гасіння лісових пожеж впродовж всього пожежонебезпечного сезону;
- розроблення програми для оновлення пожежної та допоміжної техніки для гасіння лісових пожеж;
- організація системи управління вогнем як засобом профілактики виникнення лісових пожеж;
- оновлення матеріальної бази добровільних товариств пожежної охорони лісу, організація координації роботи служб пожежної охорони лісу, які розділені по регіонах;
- проведення планових заходів протипожежної агітації щодо профілактики лісових пожеж.

Оскільки хвойні молодняки становлять більшу небезпеку, ніж насадження у старшому віці чи листяні ліси, тому актуальним є удосконалення заходів пожежної профілактики як основної складової запобігання пожежам та методів оцінювання небезпеки в залежності від віку.

1.5. Ідея роботи, мета і задачі досліджень

Викладено вище дало підставу сформулювати ідею роботи, яка полягає в підвищенні ефективності забезпечення пожежної безпеки в молодих соснових лісах України шляхом удосконалення методології та методики оцінювання їх природної пожежної небезпеки, яка враховує особливості впливу чинників на її стан.

Метою роботи було розкриття особливостей впливу чинників на пожежну безпеку соснових молодняків лісового фонду України як наукового підґрунтя підвищення ефективності забезпечення їх пожежної безпеки.

Для досягнення поставленої мети визначено до розв'язання такі завдання досліджень:

- здійснити аналіз світової та національної статистики лісових пожеж, а також сучасного стану забезпечення пожежної безпеки соснових насаджень лісового фонду України та виявити шляхи його покращання;

- обґрунтувати та апробувати застосування методу діелькометрії для визначення вологості хвої як чинника впливу на показники її пожежної безпеки, а також розробити пристрій для дослідження займистості твердих горючих речовин та матеріалів з використанням електронагрівального елемента;

- провести експериментальні дослідження з виявленням впливу чинників на показники пожежної безпеки хвої соснових молодняків в лабораторних і польових умовах;

- провести експериментальні дослідження з виявленням впливу чинників на процеси виникнення та поширення горіння в молодих соснових насадженнях;

- провести математичне моделювання процесів займання хвої сосни звичайної та оцінити ймовірність виникнення лісової пожежі в соснових молодняках;

- провести комп'ютерне моделювання процесів виникнення та поширення пожеж соснових молодняків і за його результатами удосконалити, а також апробувати методологію та методику оцінювання їх пожежної безпеки;

- апробувати та впровадити результати досліджень.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДОЛОГІЯ ТА МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Обґрунтування методології та методів досліджень з розкриття особливостей впливу чинників на пожежну небезпеку молодих соснових насаджень лісового фонду України

Виходячи з актуальності наукового завдання розкриття особливостей впливу чинників на пожежну небезпеку молодих соснових насаджень лісового фонду України як наукового підґрунтя підвищення ефективності забезпечення їх пожежної безпеки, а також для реалізації поставлених завдань досліджень запропоновано методологію та визначено методики досліджень, блок-схему яких представлено на рис. 2.1.

Методологія передбачає, зокрема:

- проведення аналізу світової та національної статистики лісових пожеж;
- проведення аналізу сучасного стану забезпечення пожежної безпеки в молодих соснових лісах України;
- обґрунтування методів та методик досліджень;
- проведення експериментальних досліджень показників пожежної небезпеки лісових горючих матеріалів у соснових молодняках;
- дослідження процесів поширення пожеж в молодих соснових лісах;
- моделювання пожеж у молодих соснових лісах;
- одержання нових наукових результатів;
- удосконалення методологічної та методичної бази;
- апробування результатів досліджень;
- впровадження результатів досліджень.

Кінцевим результатом реалізації запропонованої методології є створення передумов підвищення ефективності забезпечення пожежної безпеки в молодих соснових лісах України.

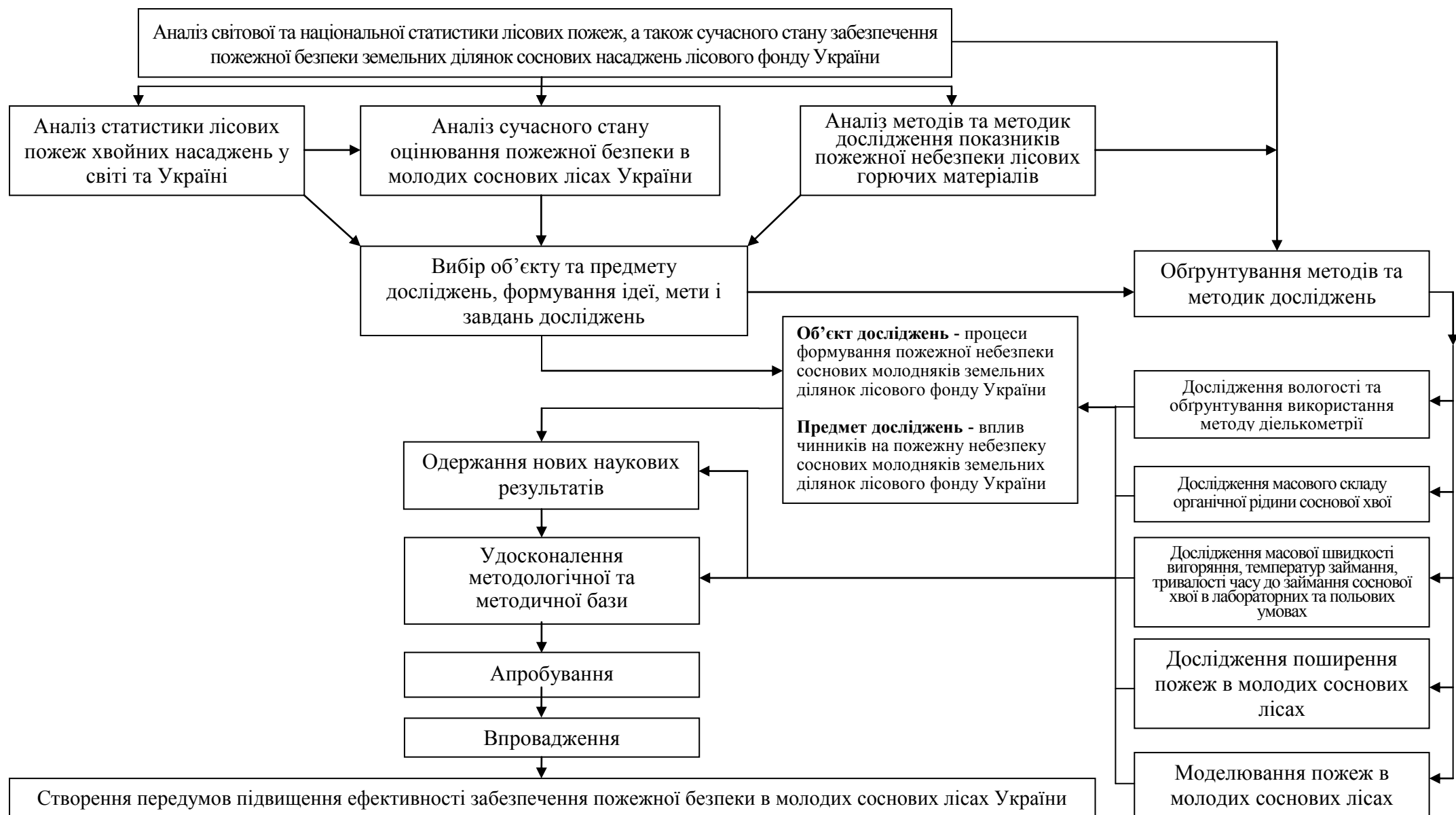


Рисунок 2.1 – Блок-схема методології проведення досліджень

Нижче наведено методики, які використовувались під час проведення досліджень.

2.2. Визначення вологості хвої молодих соснових насаджень методом діелькометрії

Вологість будь-якого матеріалу зумовлює його діелектричні властивості. Це стосується і хвої соснових молодняків. Вміст води у хвої не є постійним, залежить від місця зростання, погодно-кліматичних умов та може змінюватися з часом. Лісорослинні та погодно-кліматичні умови зумовлюють вологість ґрунту та середовища під наметом. Вологість хвої залежить також від структури насадження, віку, зімкнутості крон та розташування на дереві. Перелічені чинники також впливають на вологість опалої хвої у складі підстилки.

Дослідження вологості хвої підстилки проводять з використанням вагового методу [7], [79]. Проте цей метод потребує тривалого висушування та відповідного обладнання, відсутнього в польових умовах. Тому розроблено метод, з використанням якого можливо оперативно визначати значення вологості, зокрема у польових умовах. В [113] обґрунтовано метод діелькометрії для оцінювання вологості листя дерев за величиною ємності конденсатора з листком між пластинами. Цей метод взято за основу для проведення досліджень з визначення вологості хвої сосни звичайної.

Обґрунтування методу включає такі етапи:

- встановлення значень та отримання залежності вологості хвої сосни звичайної від тривалості її природного висушування з використанням вагового методу;
- встановлення значень та отримання залежності ємності конденсатора з внесеною хвоєю між його пластинами від тривалості її висушування;
- отримання регресійної моделі вологості сосни звичайної від ємності конденсатора з хвоєю між пластинами.

В процесі дослідження використовували лабораторне устаткування та повірені засоби вимірювання, які наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1.

Засоби вимірювальної техніки для проведення випробувань

Найменування приладу чи обладнання	Заводський номер	Границя вимірювання	Клас точності
Ваги ВТУ 210/С3	1825	від 0.01 до 210.0 г	3
Мультиметр UT-601	0095	від 200 пФ до 20 мкФ	2
Сушильна камера 2В151	2925	від 20°C до 250°C	не передбачено

Конденсатор виготовили з двох текстолітових пластин розмірами 30×40 мм, вкритих мідною фольгою. Між пластинами розміщали 30 хвоїнок. Принципова схема роботи мультиметра з підключеним конденсатором зображена на рис. 2.2.

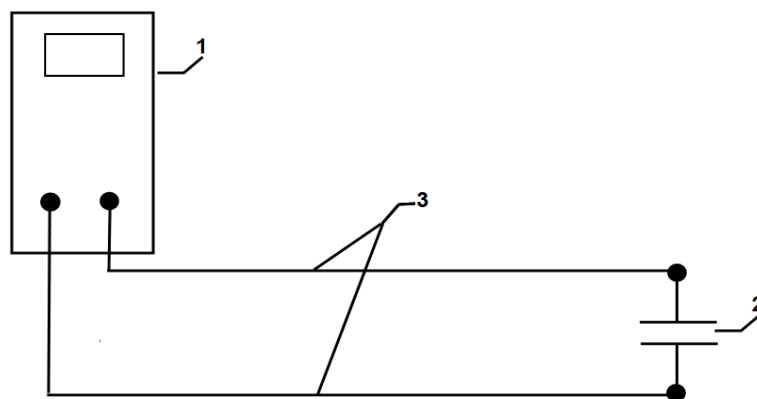


Рисунок 2.2 – Схематичне зображення приладу для визначення величини вологості хвої методом діелькометрії

1 – Цифровий вимірювач ємності (мультиметр); 2 – конденсатор, між пластинами якого розміщували хвою; 3 – з'єднувальні проводи

В процесі досліджень використовували хвою сосни звичайної віком 7 років, відібрану в насадженнях на території Жовківського р-ну Львівської

обл. З хвої сформували п'ять зразків по 30 голок (хвоїнок) у кожному. Зразки розміщували у приміщенні з температурою повітря $21 \pm 1^\circ\text{C}$ та відотною вологістю $46 \pm 2\%$ на паперовій основі. Щоденно, у визначений час, визначали масу зразків та ємність конденсатора із зразками хвої між пластинами.

На 25-ий день визначення величини маси зразків хвої та ємності конденсатора зі зразками практично не змінилися порівняно з результатами попереднього. На 26-ий день також змін не спостерігалось і дослідження було припинено.

Під час 2-го етапу випробувань визначали вологість хвої. Провели досушування зразків до сухого стану у сушильній камері за температури $100 \pm 5^\circ\text{C}$ протягом 2 годин. Перед початком сушіння провели контрольні вимірювання маси та ємності хвої. Результат був аналогічний до значень, отриманих на 26-й день досліджень. Після завершення висушування визначено масу зразків та ємність конденсатора з хвоєю (табл.2.2)

Таблиця 2.2

Значення маси зразків хвої та ємності конденсатора з хвоєю після висушування до постійних значень

Досліджувані зразки [маса, г/ємність, нФ]					
1	2	3	4	5	Середнє значення
1,11/14,20	1,06/14,00	1,09/14,00	1,01/14,70	0,9/14,90	1,03/14,36

Розраховані експериментальні дані занесені до протоколу проведення випробувань. За значеннями маси зразків, визначеними впродовж 26 днів випробувань, отримали залежність вологості хвої сосни звичайної від тривалості висушування (рис. 2.3).

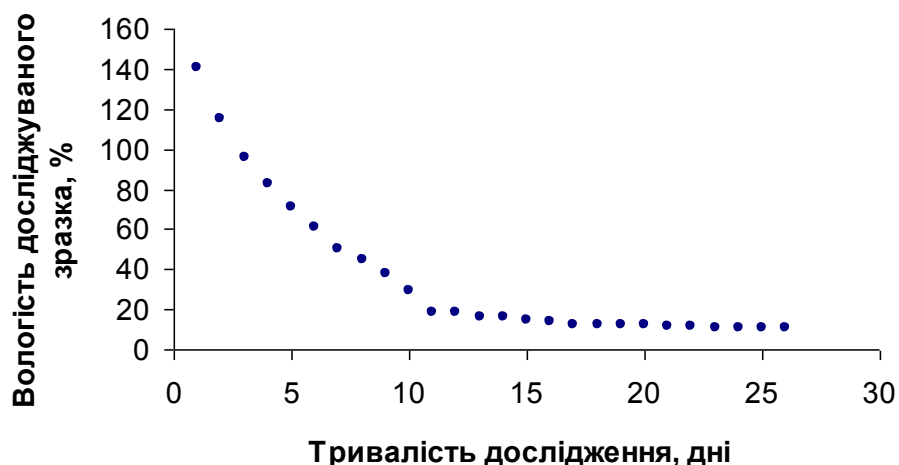


Рисунок 2.3 – Залежність вологості хвої сосни звичайної від тривалості висушування

Динаміку зміни ємності конденсатора з хвоєю між пластинами, отриману протягом дослідження, зображено на рис. 2.4.

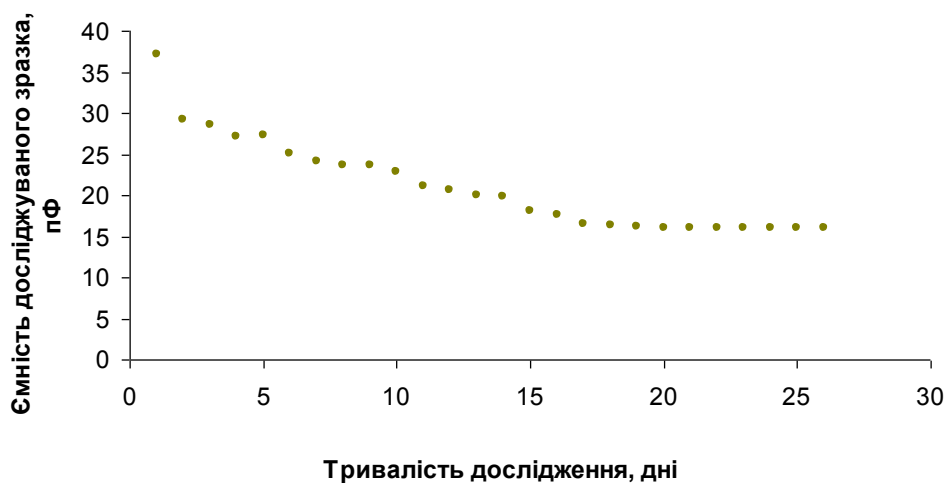


Рисунок 2.4 – Залежність ємності конденсатора з хвоєю між пластинами від тривалості висушування

Як видно з рис. 2.3 і рис. 2.4, маса хвої, а також її ємність з часом зменшуються. Слід зазначити, що отримані залежності вологості хвої та ємності конденсатора з хвоєю від часу є нелінійними, що свідчить про неоднакову швидкість зміни цих показників у процесі висушування.

Об'єднавши обидві залежності, отримали залежність вологості хвої від ємності конденсатора з хвоєю між пластинами (рис. 2.5).

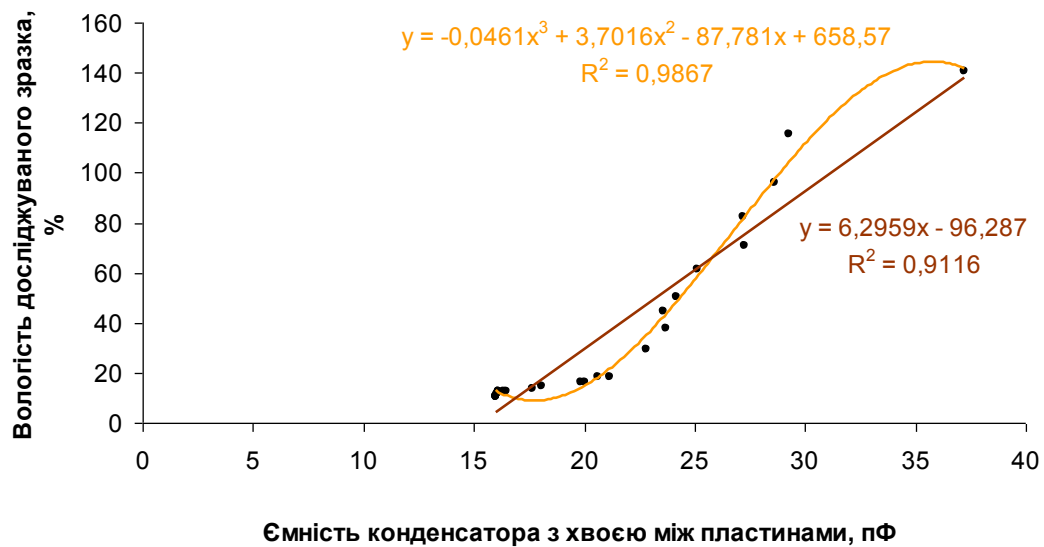


Рисунок 2.5 – Залежність значень вологості сосни звичайної від значень ємності конденсатора з хвоєю між його пластинами

Залежність вологості хвої сосни звичайної W , % від ємності конденсатора C , пФ описує лінійна залежність $W = 6,2959C - 96,287$ з коефіцієнтом достовірності апроксимації $R^2 = 0,9116$. Проте більш точною є поліноміальна регресійна модель третього порядку $W = -0,0461C^3 + 3,7016C^2 - 87,781C + 658,57$ з коефіцієнтом достовірності апроксимації $R^2 = 0,9867$.

Отримана поліноміальна регресійна модель реалізує метод діелькометрії для визначення вологості хвої сосни звичайної за її діелектричною проникністю, відображеною у ємності конденсатора з хвоєю між пластинами.

Запропонований метод дає змогу визначати вологість хвої соснових насаджень та оцінювати їх пожежну небезпеку в польових умовах.

2.3. Визначення масового вмісту органічної рідини – продукту піролізу хвої соснових насаджень

Визначення масового вмісту органічної рідини – продукту піролізу хвої соснових насаджень проводили за запропонованою методикою, суть якої полягала у визначенні масового вмісту органічної рідини у продуктах піролізу

хвої сосни звичайної, відділеної від маси сухого залишку піролізованої хвої та води.

Дослідженню підлягали свіжозірвана та опала хвоя сосни звичайної у віці 5–20 років, а також свіжозірвана та опала у віці більше 20 років.

Для проведення досліджень використовували такі засоби:

- 1) ваги лабораторні ВТУ 210/С3, клас точності 4;
- 2) кавомолку Bosch КМ13;
- 3) колбу круглодонну лабораторну ТС об'ємом 1000 мл, клас точності 2;
- 4) колбу конічну лабораторну Termisil об'ємом 100 мл, клас точності 1;
- 5) алонж лабораторний АИ-29/32;
- 6) електроплиту лабораторну;
- 7) холодильник скляний лабораторний ХПТ-1, довжиною 300 мм;
- 8) термометр лабораторний ТЛС-2, діапазон вимірювань від -30 до +70 °С, похибка вимірювань $\pm 0,1$ °С.
- 9) розподільну воронку ВД-3-100;
- 10) сульфат амонію безводний марки ХЧ згідно з ГОСТ 3769-78;

Обладнання для проведення перегонки та отримання продукту піролізу хвої зображено на рис.2.6.

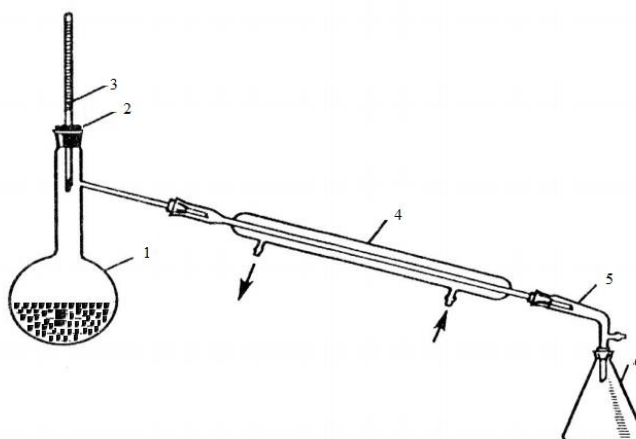


Рисунок 2.6. - Обладнання для проведення простої перегонки

- 1 – колба для вихідної речовини; 2 – пробка з отвором для термометра;
 3 – термометр лабораторний ТЛС-2; 4 – холодильник лабораторний ХПТ-1; 5 –алонж; 6 – приймальна колба

Порядок проведення досліджень. Свіжозірвану хвою сосни звичайної подрібнювали з використанням кавомолки, відбирали наважку 100 г, яку поміщали у круглодонну колбу 1 об'ємом 1000 мл. Горловину колби ущільнювали пробкою 2. В отворі пробки з дотриманням герметичності вставляли термометр 3 для контролю значення температури в процесі піролізу хвої у внутрішньому середовищі колби. До одного кінця лабораторного холодильника 4 приєднали колбу з хвоєю, до іншого – алонж 5 з приймальною колбою 6.

Щільно закриту колбу з хвоєю розміщували на піщаній бані, яку підігрівали за допомогою лабораторної плити до температури 100°C за показником термометра. При цьому внаслідок піролізу у колбі 6 накопичувалась рідина – продукт піролізу хвої, яка потім відбиралась для хімічного аналізу на вміст органічної та неорганічної складових.

Вмикали електронагрівальний прилад і доводили температуру внутрішнього середовища колби з хвоєю до 100°C, підтримуючи її протягом всього процесу піролізу. Тривалість процесу піролізу становила близько 6 год, після закінчення якого отриману рідину зважували на лабораторних вагах.

З метою відділення органічної складової в рідкій фазі продуктів піролізу хвої від води до суміші рідин в колбу 6 додавали надлишок порошку сульфату амонію безводного марки ХЧ згідно з ГОСТ 3769-78 масою 25 г, розміщували інгредієнти та переливали до повного розчинення сульфату амонію. Розподільну воронку ВД-3-100 наповнювали перемішаною рідкою фазою продуктів піролізу з розчиненим сульфатом амонію, струшували, і після розділення рідких фаз у воронці зливали нижню фракцію (воду) та ваговим методом визначали масу органічної рідкої фази – продукту піролізу хвої. Вміст органічної складової продуктів піролізу хвої визначали як різницю між масою завантаженої в колбу 1 хвої та визначеною масою води в продуктах піролізу.

2.4. Методика визначення масової швидкості вигорання хвої соснових насаджень

Методика визначення масової швидкості вигорання хвої молодих соснових насаджень розроблена на основі проведення наукових досліджень у рамках науково-дослідної роботи «Пожежна небезпека соснових насаджень у молодому віці».

Суть методики полягає у визначенні динаміки втрати маси хвої соснових молодняків впродовж її вигорання в кюветі, встановленій на чашці ваг, внаслідок її підпалу спеціальним газовим пальником.

Для проведення експерименту масової швидкості вигорання використовували таке обладнання та засоби вимірювання:

- 1) ваги електронні лабораторні BTU 210/C3, клас точності 4;
- 2) основу з негорючого матеріалу для розміщення зразків хвої на чашці електронних лабораторних ваг BTU 210/C3;
- 3) секундомір лабораторний СОСПР-2б, діапазон вимірювань від 0 до 1800 с, клас точності 2;
- 4) газовий насадок-пальник, приєднаний до балона з пропаном.

Обладнання для проведення експерименту зображено на рис 2.7.

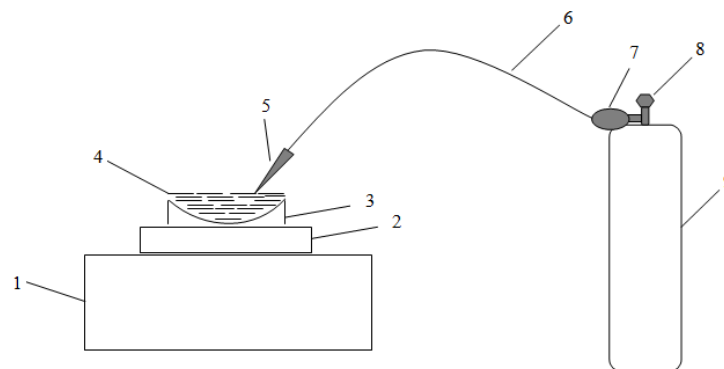


Рисунок 2.7. – Схематичне зображення установки з визначення масової швидкості вигорання соснової хвої

1 – ваги електронні лабораторні BTU 210/C3; 2 – кювета з негорючого матеріалу; 3 – чашка електронних лабораторних ваг; 4 – хвоя; 5 – пальник; 6 – рукав газового пальника; 7 – редуктор; 8 – вентиль балона; 9 – балон з пропаном.

Порядок проведення досліджень. З використанням ваг 1 відбирають наважку хвої масою $5 \pm 0,01$ г з визначеною попередньо вологістю із

використанням запропонованого методу дієлькометрії та поміщають у кювету з негорючого матеріалу 2, після чого встановлюють її на чашку ваг 3. Відкручують вентиль 8 балона з пропаном і підпалюють пальник 5 сірником. Підносять запалений пальник до поверхні хвої 4 в кюветі і з моменту виникнення полуменевого горіння за показниками секундоміра через кожні 10 с фіксують значення маси хвої, яка вигоряє. Результати визначень заносять у таблицю та будують відповідний графік залежності зміни маси від тривалості горіння.

2.5. Методика визначення температури та проміжку часу до займання хвої соснових насаджень від полуменевого джерела у лабораторних умовах

Дослідження визначення температури та проміжку часу до займання хвої соснових насаджень у лабораторних умовах від полуменевого джерела проводили згідно з ГОСТ 12.1.044-89 «Пожаровзрывоопасность веществ и материалов» [90].

Суть методики полягає у визначенні найменшої температури, за якої відбувається самостійне стійке горіння хвої після виникнення займання внаслідок короткочасного контакту з спеціальним пальником – джерелом запалювання [43], [90]. Перелік обладнання та повірених засобів, які застосовувались в методиці, наведено в табл. 2.3.

Таблиця 2.3.

Технічне обладнання та засоби для дослідження температури займання та проміжку часу до займання в лабораторних умовах

Найменування приладу чи обладнання	Заводський номер	Границя вимірювання	Клас точності
Ваги BTU 210/C3	1825	від 0.04 до 12.0 кг	4
Прилад ОТП	0095	від 0°C до 600°C	2
Мультиметр UT-601	10324	від 200 пФ до 20 мФ	2
Секундомір СОСПР-2б	8225	від 0 до 1800 с	2

Обладнання для визначення температури займання зображено на рис. 2.8.

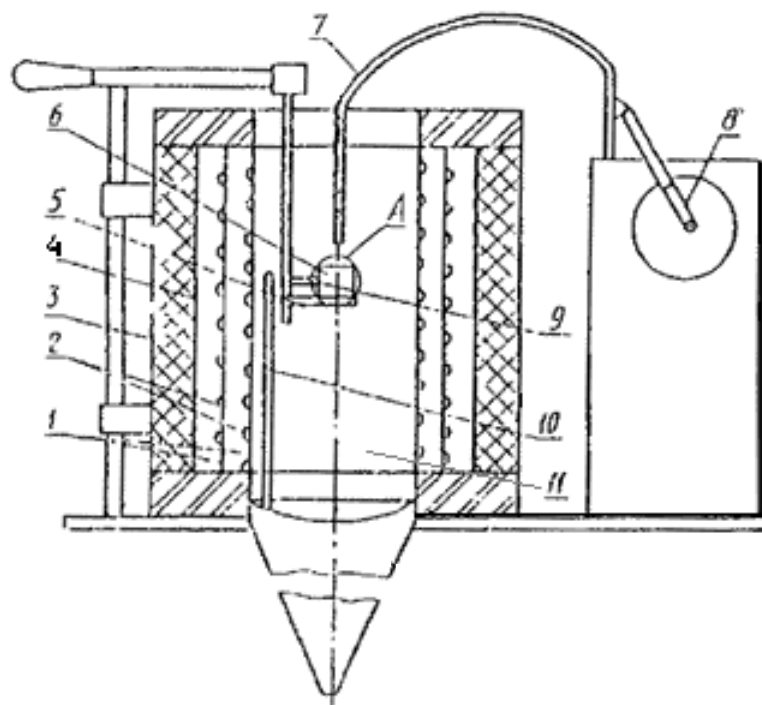


Рисунок 2.8 – Прилад ОТП [90]

1 – скляні циліндри, 2 – спіральні електронагрівачі; 3 – теплоізоляційний матеріал; 4 – сталевий екран; 5 – утримувач зразка; 6 – контейнер; 7 – газовий пальник; 8 – електропривід пальника; 9, 10 – термоелектричні перетворювачі; 11 – реакційна камера.

Послідовність проведення експерименту.

Хвою масою 200 г розміщували на горизонтальній поверхні лабораторного столу за температури повітря у приміщенні 19 ± 2 °C і щодня впродовж 6 днів із загальної сукупності хвої формували чотири зразки масою по 3 г кожен. Для кожного із чотирьох зразків хвої визначали вологість запропонованим методом дієлькометрії. Після визначення вологості кожен із зразків хвої подрібнювали, укладали у ємність із фольги розмірами 30x30x8 мм, та підносили до приладу ОТП. Реакційну камеру 11 приладу ОТП нагрівали до температури 300°C. Після досягнення значення температури 300°C у реакційній камері 11 виймали утримувач зразка 5 з контейнером 6, і поміщали одну ємність із зразком хвої в контейнері 6. Вмикали подачу газу, сірником підпалювали газовий пальник 7 і формували полум'я газового пальника

довжиною 10 ± 2 мм. Після цього утримувач зразка 5 з контейнером 6 вводили у реакційну камеру 11. З періодичністю 10 ± 2 с на відстань 10 ± 1 мм підводили газовий пальник 7 до зразка хвої у реакційній камері 11 та спостерігали за виникненням займання. У разі виникнення полуменевого горіння зразка хвої у реакційній камері фіксували значення температури займання термопарою, а проміжок часу до виникнення горіння – секундоміром. Кількість паралельних дослідів – 4. Результати дослідження заносили до таблиці та будували відповідні графіки. За температуру займання приймали найменше усереднене значення, за якого спостерігалось стійке горіння хвої в ємності з фольги у реакційній камері після видалення джерела запалювання.

Якщо при встановленій у реакційній камері температурі відбувалось займання хвої, то дослід припиняли, а контейнер із зразком хвої виймали з реакційної печі та у протоколі робили про це відповідний запис. Наступний дослід проводили з використанням нового зразка хвої за меншої температури у реакційній камері, наприклад, на 50°C менше.

2.6. Методика визначення проміжку часу до займання хвої соснових насаджень від високотемпературного джерела у польових та лабораторних умовах

Методика визначення температури та проміжку часу до займання хвої соснових насаджень у лабораторних та польових умовах від високотемпературного джерела розроблена на основі проведення наукових досліджень у рамках науково-дослідної роботи «Пожежна небезпека соснових насаджень у молодому віці».

Суть методики полягає у визначенні найменшої температури, за якої відбувається самостійне стійке горіння хвої після виникнення займання внаслідок короткочасного контакту з нагрітим до високої температури джерелом – електронагрівальним елементом. Перелік повірених засобів вимірювання, які застосовувались в методиці, наведено в табл. 2.4.

Таблиця 2.4.

Засоби вимірювання для визначення температури займання та проміжку часу до займання у польових та лабораторних умовах

Найменування приладу чи обладнання	Заводський номер	Границя вимірювання	Клас точності
Мультиметр UT-601	10324	від 200 пФ до 20 мкФ	2
Мультиметр DT9208A	1408231223	від $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$	2
Секундомір СОСПР-2б (у лабораторії)	8225	від 0 до 1800 с	2
Секундомір Casio HS-3V (у польових умовах)	65234113	від 0 до 36000 с	1

Особливість методики полягає у використанні запатентованого «Пристрою для дослідження займистості горючого матеріалу з використанням електронагрівального елемента» (далі ПДЗМ), який використовували в сукупності з мультиметром DT9208A та термоперетворювачем TP-04 (рис. 2.9).

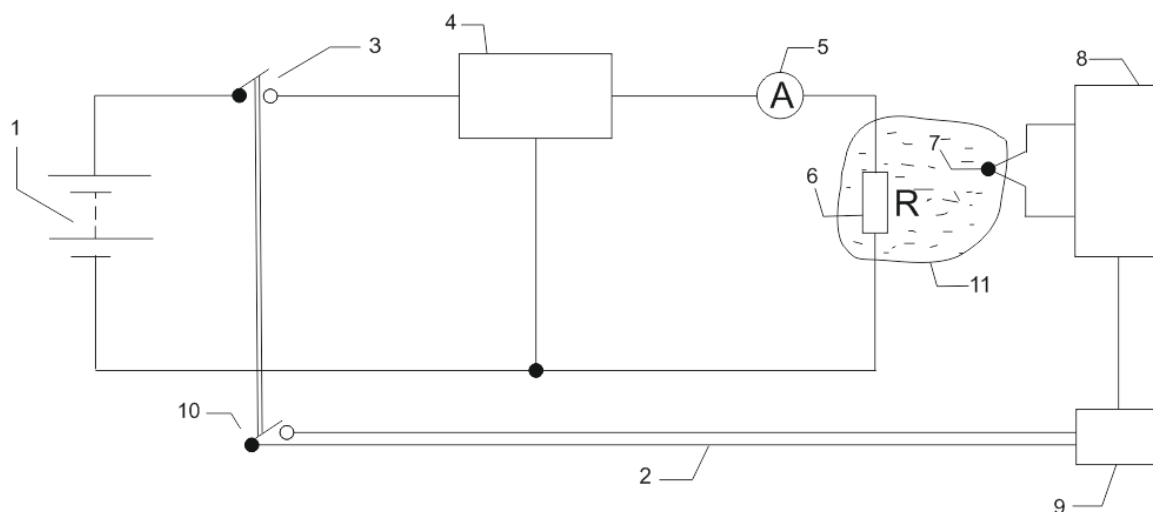


Рисунок 2.9 – Структурна схема роботи пристрою для дослідження займистості горючого матеріалу з використанням електронагрівального елемента [78]

1 – акумуляторна батарея; 2 – з'єднувальні проводи; 3, 10 – вимикачі; 4 – стабілізований регулятор струму; 5 – амперметр; 6 – електронагрівальний елемент; 7 – термоперетворювач TP-04; 8 – вторинний перетворювач температури; 9 – пристрій обробки і збереження даних – мультиметр DT9208A; 11 – горючий матеріал

Порядок проведення досліджень у польових умовах. В середовищі соснових молодняків, під наметом, досліджували п'ять ділянок лісової підстилки. З кожної ділянки відбирали 30 соснових хвоїнок, що входять до складу підстилки, та визначали їх вологість запропонованим методом діелькометрії. ПДЗМ та мультиметр DT9208A 9 розташовували на горизонтальній поверхні (землі) під наметом у радіусі 1000 ± 250 мм від місця встановлення електронагрівального елемента 6. З використанням з'єднувальних проводів 2 ПДЗМ сполучали з мультиметром DT9208A, до якого заздалегідь приєднали термоперетворювач ТР-04 7. Вмикали ПДЗМ та мультиметр DT9208A з термоперетворювачем. З використанням стабілізованого регулятора струму 4 налаштовували силу струму акумуляторної батареї 1 ПДЗМ до значення, за якого температура електронагрівального елемента становила необхідне значення (близько 500°C). Електронагрівальний елемент встановлювали на поверхню горючого матеріалу 11 соснової підстилки. Термоперетворювач утримували на відстані 7 ± 2 мм від електронагрівального елемента з метою фіксації значення температури у випадку виникнення займання. Проміжок часу до виникнення займання визначали секундоміром Casio HS-3V. Кількість паралельних дослідів – 5. За температуру займання приймали найменше усереднене значення, за якого спостерігалось стійке горіння підстилки після усунення електронагрівального елемента. Результати заносили до таблиці для проведення розрахунків досліджень.

Порядок проведення досліджень у лабораторних умовах. Досліджували десять хвоїнок – п'ять свіжозірваних та п'ять сухих. ПДЗМ та мультиметр DT9208A розташовували у приміщенні, на горизонтальній негорючій поверхні лабораторного стола. Електронагрівальний елемент закріплювали у щипцях лабораторного штативу ШЛ-03. З використанням з'єднувальних проводів ПДЗМ сполучали з мультиметром DT9208A, до якого заздалегідь приєднали термоперетворювач ТР-04. Вмикали ПДЗМ та мультиметр DT9208A з термоперетворювачем. З використанням стабілізованого

регулятора струму 4 налаштовували силу струму акумуляторної батареї ПДЗМ до значення, за якого температура електронагрівального елемента становила близько 500°C. Один кінець хвоїнки утримували з використанням пінцету лабораторного DL.780.010 таким чином, щоб забезпечити контакт іншого кінця з електронагрівальним елементом. Термоперетворювач утримували на відстані 7 ± 2 мм від електронагрівального елемента з метою фіксації значення температури у випадку виникнення займання хвоїнки. Проміжок часу до виникнення займання визначали секундоміром СОСПР-26. Кількість паралельних дослідів – 5. У випадку займання хвоїнки за температуру займання приймали найменше усереднене значення, за якого спостерігалось полум'яне горіння. У випадку тління хвоїнки визначали довжину її обвугленої частини. Результати заносили до таблиці для проведення розрахунків досліджень.

2.7. Методика визначення лінійної швидкості поширення горіння підстилки соснових молодняків за умовами погоди

Суть методики полягає у встановленні величини лінійної швидкості поширення горіння хвойної підстилки соснових молодняків. Для досліджень використано 5 ділянок розмірами 0,5×0,1 м під наметом соснових молодняків віком 15 років. Експериментальне підпалювання здійснювали для кожної ділянки 6 разів. Для цього матеріал підстилки змінювали для наступного підпалу на новий шляхом насипання зібраної поблизу. Опади імітували з використанням побутового обприскувача – 2, 4, 6, 8 і 10 мм відповідно. Великою 1 мм опадів для досліджуваних ділянок вважали 50 мл води [71]. Для підпалювання підстилки використовували суміш дерев'яних опилок та дизпалива, а також сухий спирт. Відстань поширення горіння визначали рулеткою Torex 8m 27C308, а тривалість горіння – секундоміром Casio HS-3V. Результати заносили до таблиці, після чого будували залежність відстані поширення полум'я від тривалості горіння.

2.8. Методика визначення лінійної швидкості поширення пожежі молодих соснових насаджень у польових умовах

Визначення лінійної швидкості поширення пожежі молодих соснових насаджень проводили за запропонованою методикою, суть якої полягала у встановленні величин лінійних швидкостей поширення полум'я шляхом проведення експериментальної пожежі. Перелік обладнання та повірених засобів, які застосовувались в методиці, наведено в табл. 2.5.

Таблиця 2.5.

Засоби вимірювання для визначення температури займання та проміжку часу до займання у польових та лабораторних умовах

Найменування приладу чи обладнання	Заводський номер	Границя вимірювання	Клас точності
Мультиметр UT-601	10324	від 200 пФ до 20 мкФ	2
Рулетка Торех 8m 27C308	не передбачено	від 0 до 8000 мм	1
Секундомір Casio HS-3V	65234113	від 0 до 36000 с	1
Метеостанція Kestrel 4000	450632	від 0 до 40 м/с	1
Фотокамера цифрова Canon powershot a550	13964717	7,1 мегапікселів	не передбачено

Підготовка до проведення досліджень включає:

- вибір місцевості для проведення дослідження;
- вибір ділянки місцевості та визначення її розмірів для проведення експериментальної пожежі;
- відбір необхідної кількості соснових дерев;
- формування ділянки соснових насаджень розмірами 5,5×3,5 м для проведення експерименту;
- формування лісової підстилки на ділянці для проведення експерименту;
- створення протипожежних перешкод на місці проведення експериментальної пожежі.

Створювали штучне насадження віком біля 8 років, середньою висотою 1,5 м та відстанню між сусідніми деревами 0,8 м. Дерева розташовували в 3 ряди по 5 дерев у кожному. Наземним горючим матеріалом на ділянці була сформована хвойна підстилка, товщина якої становила до 3 см. По периметру ділянки створювали протипожежні розриви шириною 0,5 м. З використанням метеостанції Kestrel 4000 встановлювали величини атмосферного тиску, температури та відносної вологості повітря, а також швидкості вітру. Запропонованим методом дієлькометрії визначали вологість хвойної підстилки. Стрічку вимірної рулетки зі шкалою Torex 8m 27C308 прокладали вздовж дослідної ділянки. Підпал підстилки здійснювали попередньо запаленим факелом з довжиною ручки 1,5 м. В процесі поширення полум'я за показниками секундоміра Casio HS-3V через кожні 10 с фіксували значення відстані, пройденої вогнем відповідно до шкали рулетки. Схема дослідної ділянки для проведення експериментальної пожежі зображена на рис 2.10.

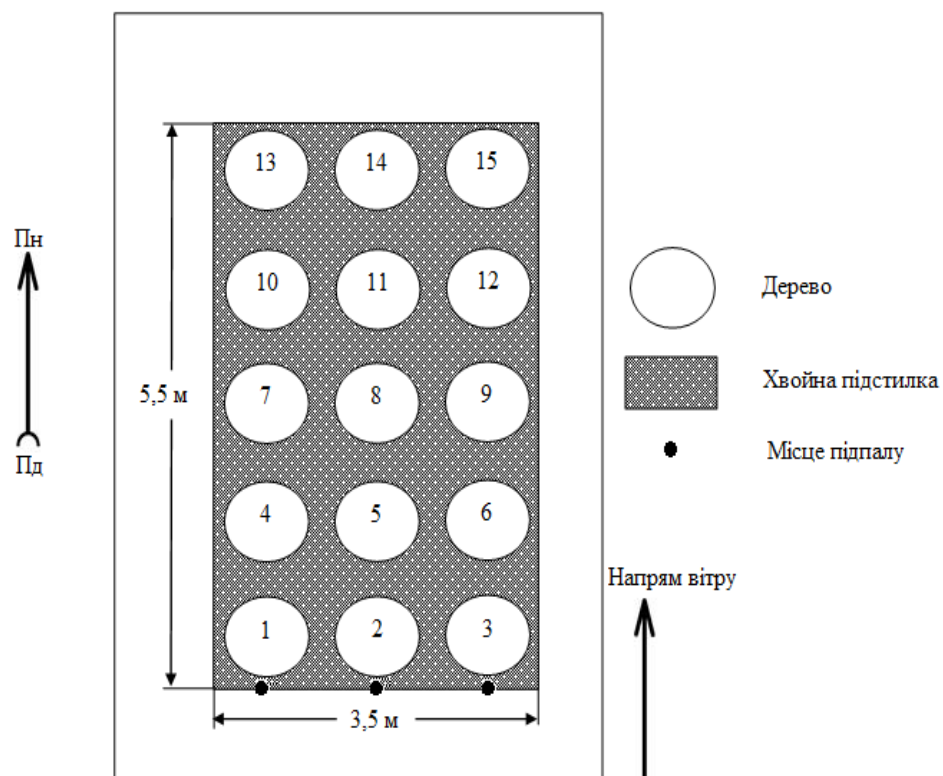


Рисунок 2.10 – План-схема ділянки для проведення дослідження

Результати заносили до таблиці для побудови залежності відстані поширення полум'я від тривалості горіння.

2.9. Методика визначення лінійної швидкості поширення пожежі молодих соснових насаджень з використанням комп'ютерного моделювання

Визначення лінійної швидкості поширення пожежі молодих соснових насаджень проводили за запропонованою методикою, суть якої полягала у встановленні величин лінійних швидкостей поширення полум'я за результатами комп'ютерного моделювання пожежі.

Дослідження проводили з використанням персонального комп'ютера з процесором Intel(R) Core i3 M330 2.13 GHz та оперативною пам'яттю 4,00 ГБ, на якому встановлено програмне забезпечення WFDS [132]. Для побудови комп'ютерної моделі ділянки задавали геометричні розміри дерев, зокрема висоту, висоту нижніх гілок, діаметр крон та стовбурів і координати кожного дерева. Відповідно до цього формували таблицю з показниками (табл. 2.6).

Таблиця 2.6

Геометричні розміри дерев досліджуваної ділянки

Висота дерева, см	Висота від нижньої гілки до поверхні грунту, см	Діаметр крони дерева, см	Діаметр стовбура на висоті 1,3 м, см
1	2	3	4

Для реалізації моделі окрім геометричних параметрів ділянки і дерев у вхідному файлі вказували фізико-хімічні властивості горючих матеріалів та мікрокліматичні умови. Інші значення параметрів моделі взяли як стандартні [131]. Задавали також швидкість вітру, температуру повітря та параметри джерела запалювання. Моделювання здійснювали на сітці розмірами 160x80x60 вузлів, геометричні розміри домену 8x4x3 м. Хімічний склад горючого матеріалу

рослинного походження – $C_{3,4}H_{6,2}O_{2,5}$; а теплота його згорання – 17700 кДж/кг [145]. Пожежонебезпечні властивості горючих матеріалів досліджуваної ділянки наведені в табл. 2.7. Візуалізацію результатів моделювання здійснювали програмою Smokeview, яка дає змогу переглядати перебіг процесу горіння у просторі [47].

Таблиця 2.7

Довідкові параметри горючих лісових матеріалів [132], які застосовувались для побудови моделі виникнення і поширення пожежі соснових молодняків з використанням програми WFDS

Назва компонента	Початкова температура, °C	Відношення площі поверхні до об'єму	Вологість, %	Щільність, кг/м ³	Насипна щільність, кг/м ³
Лісова підстилка	33	4550	6	607	20
Крони дерев	33	4000	100	520	0,6
Стовбур	33	3	100	520	520

Поширення горіння досліджували візуально та за температурою полум'я, для визначення якої під час моделювання пожежі у середовищі WFDS застосовували віртуальні термопари, розміщуючи їх у рядах посередині між деревами на висотах 0; 0,25; 0,5; 0,75 та 1 м від поверхні ґрунту.

Результати заносили до таблиці для побудови залежності відстані поширення полум'я від тривалості горіння.

2.10. Висновки за розділом

Запропоновано методологію та методики проведення досліджень з виявлення впливу чинників на пожежну безпеку виникнення та поширення горіння ділянок молодих соснових насаджень;

2.10.1. На підставі встановленої залежності значень ємності плоского конденсатора C , пФ з хвоєю між його пластинами та вологості хвої W , % яка

описується рівнянням $W = -0,0461C^3 + 3,7016C^2 - 87,781C + 658,57$, обґрунтовано та запропоновано застосування методу діелькометрії для визначення вологості хвої соснових насаджень у польових та лабораторних умовах як чинника впливу на її пожежну небезпеку.

2.10.2. Запропоновано методику визначення масового вмісту органічної рідини – продукту піролізу хвої соснових насаджень, суть якої полягає у визначенні масового вмісту органічної рідини у продуктах піролізу хвої сосни звичайної, відділеної від маси сухого залишку піролізованої хвої та води.

2.10.3. Запропоновано методику визначення масової швидкості вигорання хвої молодих соснових насаджень, суть якої полягає у визначенні динаміки втрати маси хвої соснових молодняків впродовж тривалості її вигорання в кюветі, встановленій на чашці ваг внаслідок її підпалу спеціальним газовим пальником.

2.10.4. Удосконалено відому методику визначення температури та проміжку часу до займання хвої соснових насаджень від полуменевого джерела у лабораторних умовах, суть якої полягає у визначенні найменшої температури, за якої відбувається самостійне стійке горіння хвої після виникнення займання внаслідок короткочасного контакту з спеціальним пальником – джерелом запалювання.

2.10.5. Розроблено захищений патентом України на корисну модель пристрій для дослідження займистості горючого матеріалу з використанням електронагрівального елемента та методику визначення температури займання і проміжку часу до займання хвої соснових насаджень від високотемпературного джерела у польових та лабораторних умовах.

2.10.7. Розроблено методики визначення лінійної швидкості поширення пожежі молодих соснових насаджень за результатами експериментальної пожежі та комп'ютерного моделювання у WFDS.

Результати досліджень опубліковано в [52], [53], [78], [97], [99], [100].

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1. Дослідження з виявлення впливу чинників на показники пожежної небезпеки хвої ділянок молодих соснових насаджень

Молоді соснові насадження – це лісове середовище, що характеризується великою неоднорідністю розташування горючих матеріалів, до яких належать стовбури, гілки, хвоя, а також рослини наземного ярусу – структурні елементи фітоценозу. Сукупність опалих фрагментів дерев і рослин утворює підстилку, яка також є горючим матеріалом, що зумовлює пожежонебезпечний стан лісу.

Дослідження з виявлення впливу чинників на показники пожежної небезпеки хвої молодих соснових насаджень охоплюють визначення вологості хвої сосни звичайної, масової швидкості вигорання, температури займання та часу до займання у лабораторних та польових умовах, масового складу органічних рідин хвої соснових насаджень, а також лінійних швидкостей поширення пожежі.

3.1.1. Дослідження вмісту органічної рідини – продукту піролізу хвої сосни звичайної у молодому віці

Найбільш небезпечним горючим компонентом сосни звичайної є хвоя – видозмінене листя голкоподібної форми. Хвоя є горючим фрагментом сосни звичайної, швидко реагує на умови навколишнього природного середовища, а також впливає на ріст рослин наземного ярусу. Розміри хвої сосни є мінливими в складі дерева та з віком залежать від умов зростання, а також є показниками погодних умов, не- або сприятливих для розвитку дерева. Тому значення довжини хвої за окремі роки різняться, що легко помітити на ділянках, де хвоя може утримуватися на дереві впродовж 2-3 років [52].

Як відомо, пожежна небезпека хвої сосни звичайної залежить від вмісту органічних речовин, які значною мірою зумовлюють процес горіння та, відповідно, впливають як на його інтенсивність, так і на поширення лісових пожеж хвойних насаджень [36], [76], [127]. Експериментальні дослідження з виявлення впливу віку соснових насаджень на масовий вміст складових продуктів піролізу хвої проводили за методикою, описаною у розділі 2.3. у лабораторних умовах. Об'єктом досліджень були зразки свіжозірваної та опалої хвої сосни звичайної у віці до 10 років, а також свіжозірваної та опалої хвої у віці понад 20 років. Тривалість процесу піролізу становила 6 годин. Інтенсивне виділення водяної пари при температурі 98,5°C та поступова конденсація суміші в процесі піролізу спостерігались через 2 години після початку експерименту. Результати експериментальних досліджень з визначення масового вмісту складових продуктів піролізу для хвої соснових молодняків наведено в табл. 3.1., а усереднені результати досліджень відображено на рис.3.1 та 3.2.

Таблиця 3.1.

Експериментальні результати досліджень з визначення масового вмісту складових продуктів піролізу свіжозірваної та опалої хвої соснових насаджень, залежно від їх віку

Вік соснових насаджень	Вид хвої	Масовий вміст складових продуктів піролізу, г		
		Вода	Органічна рідина	Сухий залишок піролізованої хвої
до 10 років	свіжозірвана	42,37	2,58	55,36
		43,13	2,47	52,85
		41,28	2,66	55,05
	опала	28,53	1,08	69,68
		29,98	0,98	70,11
		29,87	1,00	67,87
понад 20 років	свіжозірвана	41,12	2,11	55,87
		40,58	1,97	58,33
		39,62	2,01	56,89
	опала	27,13	1,03	70,26
		29,57	0,97	70,31
		26,34	1,06	72,76

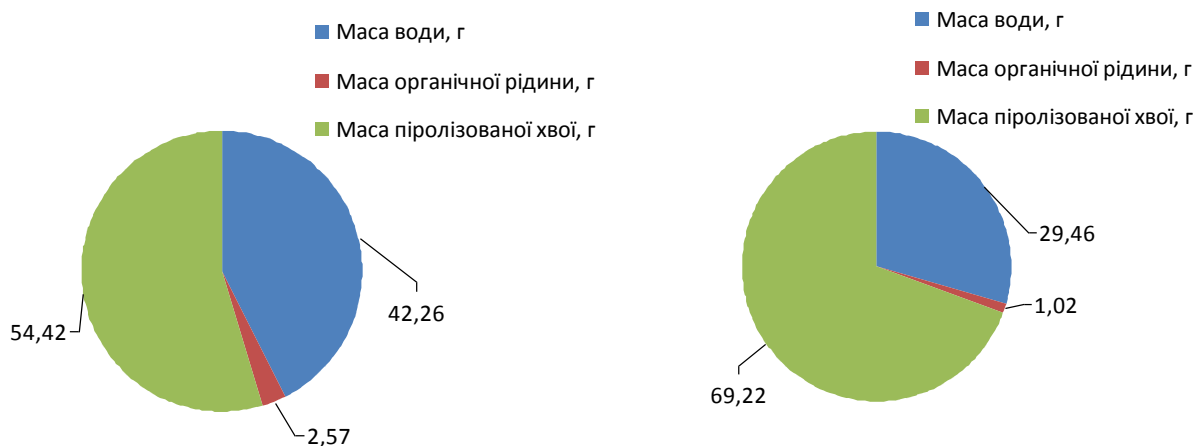


Рисунок 3.1 – Усереднені значення масової частки, % складових продуктів піролізу хвої соснових молодняків у віці 10 років: а—свіжозірвана хвоя; б—опала хвоя

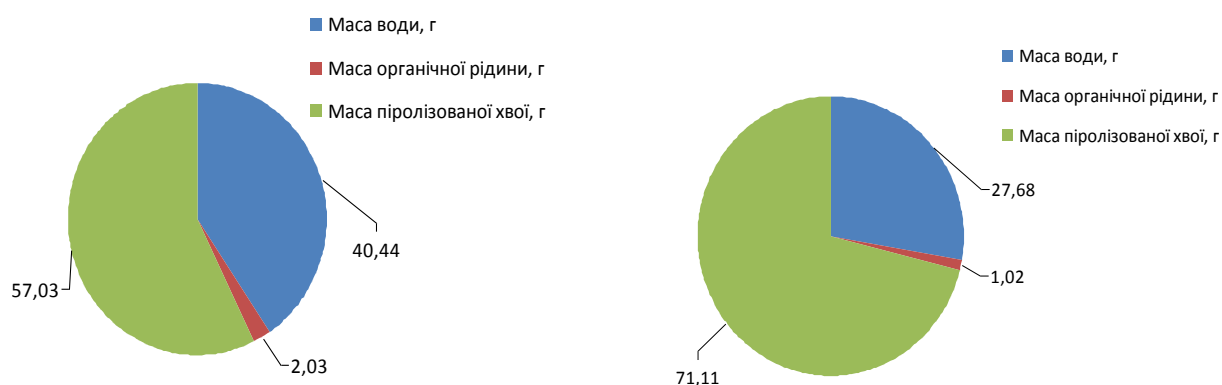


Рисунок 3.2 – Усереднені значення масової частки, % складових продуктів піролізу хвої соснових молодняків у віці понад 20 років: а—свіжозірвана хвоя; б—опала хвоя

Як видно з результатів експериментальних досліджень, проілюстрованих у табл. 3.1. та на рис. 3.1 і 3.2, вік насаджень впливає на вміст складової органічної рідини у хвої соснових насаджень. Значення вмісту складової органічної рідини у свіжозірваній хвої соснових насаджень віком до 10 років перевищує, майже в 2,5 рази, цей показник для опалої хвої. Значення вмісту складової органічної рідини у свіжозірваній хвої соснових насаджень віком

понад 20 років аналогічно перевищує майже в 2 рази цей показник для опалої хвої. Слід також зазначити, що значення вмісту складової органічної рідини у свіжозірваній хвої соснових насаджень віком 10 років є більшим в 1,25 рази порівняно зі значенням вмісту складової органічної рідини у свіжозірваній хвої насаджень віком понад 20 років. Викладене дає підставу зробити висновок, що для досліджених зразків хвої молодих соснових насаджень вміст в них органічної горючої рідини, як одного з чинників впливу на пожежну небезпеку соснових насаджень, зменшується в ряду: свіжозірвана віком до 10 років – свіжозірвана віком понад 20 років – опала віком до 10 років та понад 20 років і має значення 2,57%; 2,03% та 1,02% відповідно.

3.1.2. Експериментальні дослідження з виявлення залежності масової швидкості вигорання хвої соснових насаджень від її вологості

Окрім вологості та масового складу органічних сполук пожежну небезпеку хвої зумовлює масова швидкість її вигорання [121]. Експериментальні дослідження з виявлення залежності масової швидкості вигорання хвої соснових насаджень від її вологості проводили за методикою, описаною у розділі 2.4.

Відбір хвої здійснювали на ділянці Пустомитівського р-ну Львівської обл. Вологість хвої визначали запропонованим методом діелькометрії, описаним у розділі 2.2. Досліджували три види хвої соснових молодняків віком 10 років: свіжозірвану, опалу та висушену. Висушену хвою отримували висушуванням у лабораторній сушильній шафі за температури 105°C впродовж 2-ох годин відповідно до методики, описаної в розділі 2.2. Із хвої кожного з видів сформували п'ять зразків однакової маси. Значення середньої маси зразків кожної групи у відповідні моменти часу її горіння, а також результати експериментальних досліджень з визначення впливу вологості хвої соснових насаджень на масову швидкість її вигорання наведено в табл. 3.2 та рис. 3.3.

Таблиця 3.2

Результати експериментальних досліджень з визначення зміни маси свіжозірваної, опалої та висушеної хвої соснових молодняків залежно від тривалості її горіння

Тривалість горіння зразків хвої, с	Усереднені значення мас досліджуваних зразків хвої, г		
	Свіжозірвана W=140%	Опала W=40%.	Висушена W=12%
0	4,00±0,01	4,00±0,01	4,00±0,01
10	3,87±0,01	3,85±0,01	3,82±0,01
20	3,55±0,01	3,41±0,01	3,55±0,01
30	3,44±0,01	3,03±0,01	3,24±0,01
40	3,16±0,01	2,64±0,01	2,81±0,01
50	2,94±0,01	2,26±0,01	2,29±0,01
60	2,54±0,01	1,91±0,01	1,79±0,01

Аналіз результатів експериментальних досліджень, наведених у табл. 3.2, дає підставу зробити висновок, що до 30 с вигорання значення втрати маси зразків різних видів дослідженої хвої практично не відрізняються. Після 30 с вигорання значення маси зразків хвої зменшуються в ряду свіжозірвана–висушена–опала. На рис. 3.3 представлено криві залежностей втрати маси свіжозірваної, опалої та висушеної хвої від тривалості її горіння.

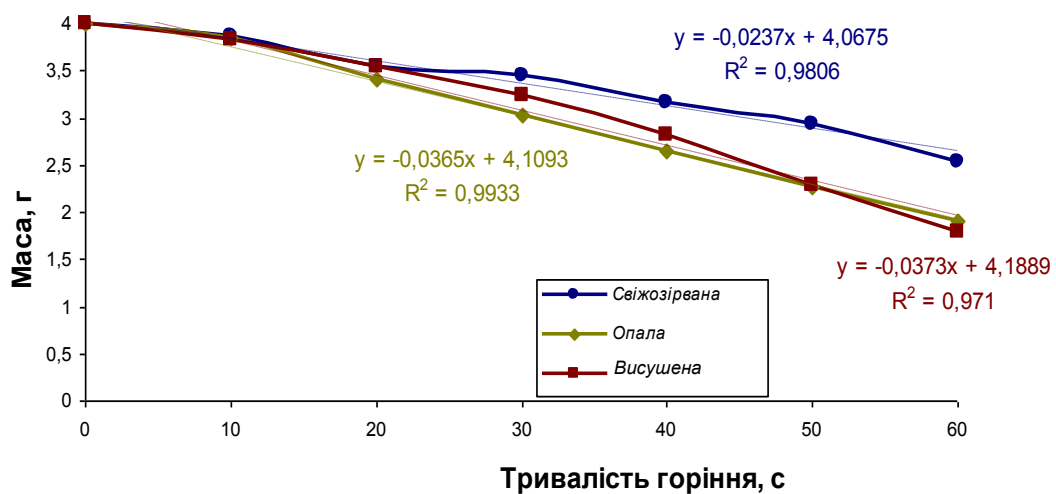


Рисунок 3.3 – Залежності зміни маси хвої сосни звичайної від тривалості її горіння: а – свіжозірваної; б – опалої; в – висушеної

Як видно з рис. 3.3, значення маси m , г хвої від тривалості її горіння τ , с в кюветі змінюються за лінійними регресійними залежностями: $m = -0,0237\tau + 4,0675$ ($R^2 = 0,9806$) – для свіжозірваної хвої; $m = -0,0373\tau + 4,1889$ ($R^2 = 0,971$) – для опалої хвої; $m = -0,0365\tau + 4,1093$ ($R^2 = 0,9933$) – для висушеної хвої.

Обчислені значення масових швидкостей вигорання хвої соснових молодняків як відношення втрат маси за проміжок часу до відповідного проміжку часу зображені на рис. 3.4.

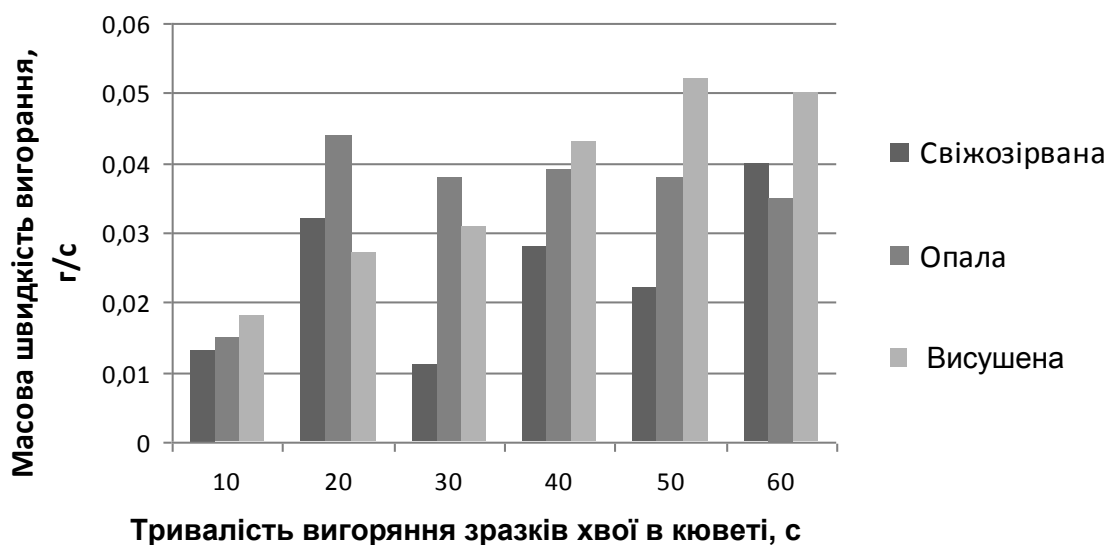


Рисунок 3.4 – Масові швидкості вигорання хвої сосни звичайної

Кутовий коефіцієнт кожної кривої залежності (рис. 3.3) є усередненим значенням відповідної масової швидкості вигорання і становить для свіжозірваної, опалої та висушеної хвої 0,0237 г/с, 0,0373 г/с, і 0,0365 г/с відповідно. Отримані таким методом значення масової швидкості вигорання практично співпадають з усередненими значеннями, отриманими в результаті розрахунків для свіжозірваної, опалої та висушеної хвої 0,0243 г/с, 0,0348 г/с і 0,0368 г/с відповідно.

На 10-ій с горіння для всіх видів хвої масові швидкості були низькими. Для зразків свіжозірваної хвої спостерігалися протягом 60 с значні коливання цього показника. Швидкість вигорання опалої хвої, починаючи з 30-ї с, була практично стабільною. Лише для сухої хвої спостерігалася постійне зростання цієї величини. Відхилення масових швидкостей вигорання від середніх значень наведені в табл. 3.3

Таблиця 3.3

Відхилення масових швидкостей вигорання хвої сосни звичайної від середніх значень, визначених як середнє арифметичне, а також за кутовим коефіцієнтом лінійної регресії

Тривалість горіння хвої, с	Відхилення масових швидкостей вигорання хвої від середніх значень, отриманих як середнє арифметичне / за кутовим коефіцієнтом, г/с		
	Свіжозірвана	Опала	Висушена
10	-0,0113/-0,0107	-0,0198/-0,0215	-0,0188/-0,0193
20	0,0077/ 0,0083	0,0092/0,0075	-0,0098/-0,0103
30	-0,0133/-0,0127	0,0032/ 0,0015	-0,0058/ 0,0063
40	0,0037/ 0,0043	0,0042/ 0,0025	0,0062/ 0,0057
50	-0,0023/-0,0017	0,0032/ 0,0015	0,0152/ 0,0147
60	0,0157/ 0,0163	0,0002/ -0,0015	0,0132/ 0,0127
Середнє абсолютне відхилення	0,0090/0,0070	0,0066/0,0060	0,0115/0,0086

Відхилення від середніх значень, визначених за кутовим коефіцієнтом лінійної регресії, є меншими, аніж у випадку визначених як середнє арифметичне. Тому значення масових швидкостей вигорання, отриманих за результатами побудови регресійної моделі, більш доцільно застосовувати на практиці.

Як видно з результатів експериментальних досліджень, що масова швидкість вигорання хвої соснових насаджень залежить від її вологості. Найбільша швидкість вигорання притаманна висушеній хвої, дещо менша – опалій у складі підстилки, а найменша – свіжозірваній.

3.1.3. Експериментальні дослідження з виявлення впливу вологості на температуру займання та проміжок часу до займання хвої молодих соснових насаджень у лабораторних умовах

Однією із важливих пожежонебезпечних властивостей хвої є її здатність до займання і поширення горіння. А такі показники хвої, як вологість, температура займання і час до займання [49], [135] є відповідно важливими,

оскільки їх застосовують для оцінювання загрози виникнення і поширення пожеж у соснових молодняках [44]. Особливо актуальним є визначення цих показників не лише для опалої, але і для живої хвої, оскільки від них залежить поширення верхових пожеж.

Експериментальні дослідження з виявлення впливу вологості хвої соснових насаджень на її температуру займання та проміжок часу до займання проводили в лабораторії пожежної безпеки Львівського державного університету безпеки життєдіяльності за методикою, описаною у розділі 2.5.

Як матеріал для експерименту було відібрано хвою сосни звичайної віком до 10 років. Хвою зірвали на території Пустомитівського р-ну Львівської обл. Впродовж дослідження значення вологості, температури та проміжку часу до займання зменшувалися. Також виявлено, що значення температур займання і проміжку часу до займання іноді різняться для окремих зразків. Було визначено початкові значення температури займання свіжозірваної хвої (рис. 3.5) та проміжки часу до займання (рис. 3.6).



Рисунок 3.5 – Значення температури займання свіжозірваної хвої сосни звичайної у молодому віці, визначені за результатами експериментальних досліджень



Рисунок 3.6 – Значення проміжку часу до займання свіжозірваної хвої сосни звичайної у молодому віці, визначені за результатами експериментальних досліджень

На основі отриманих значень показників пожежної небезпеки для чотирьох зразків обчислювали значення температури займання та проміжку часу до займання кожного дня протягом експерименту. Результати досліджень наведено в табл. 3.4.

Таблиця 3.4

Значення температури займання та проміжку часу до займання хвої сосни звичайної у молодому віці

Тривалість висушування хвої, доби	Вологість, %	Температура займання, °C / час до займання, хв			
		Зразки хвої			
		1	2	3	4
1	2	3	4	5	6
0	140	300/6,09	280/7,33	280/6,08	283/6,59

Продовження табл. 3.4

1	2	3	4	5	6
1	133	277/2,47	298/4,37	282/4,39	266/5,49
2	119	290/3,47	257/3,33	270/4,10	266/5,21
3	97	260/3,29	281/4,36	260/2,42	275/4,02
4	88	265/2,34	276/3,13	262/4,11	260/3,42
5	74	260/2,14	256/2,07	270/3,24	246/2,45
6	65	237/2,52	248/2,02	252/1,53	255/2,23

Зменшення значень температури займання та тривалості часу до займання зумовлені зниженням вологості хвої внаслідок висушування, що підтверджено за результатами використання методики [52]. Слід зазначити, що вміст органічних речовин (терпенів та ін.) [107], [115] в хвої також змінюється внаслідок висушування, хоча дещо інакше, ніж води, оскільки у порівнянні з нею органічні речовини мають інші фізико-хімічні властивості. Зокрема, температура кипіння скипидару як складової екстрактивної високомолекулярної речовини – живиці є вищою, аніж води [5]. Це може спричиняти збереженість смоляних сполук у сухій хвої навіть за умов підвищеної температури повітря у літню пору року. На рис. 3.7 зображено залежність температури займання від вологості хвої віком 10 років.

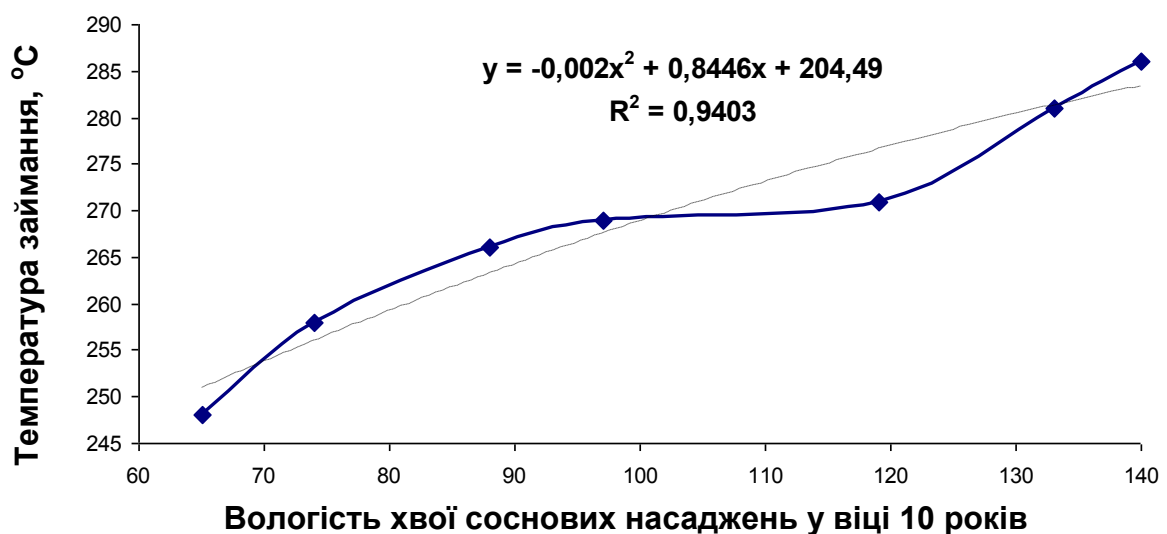


Рисунок 3.7 – Залежність температури займання хвої сосни звичайної у віці 10 років від її вологості

Як видно з рис. 3.7, залежність температури займання t , °С хвої молодих соснових насаджень від її вологості W , % описується формулою $t = -0,002W^2 + 0,8466W + 204,49$ ($R^2 = 0,9403$). На рис. 3.8 зображено залежність проміжку часу до займання від вологості хвої віком 10 років.

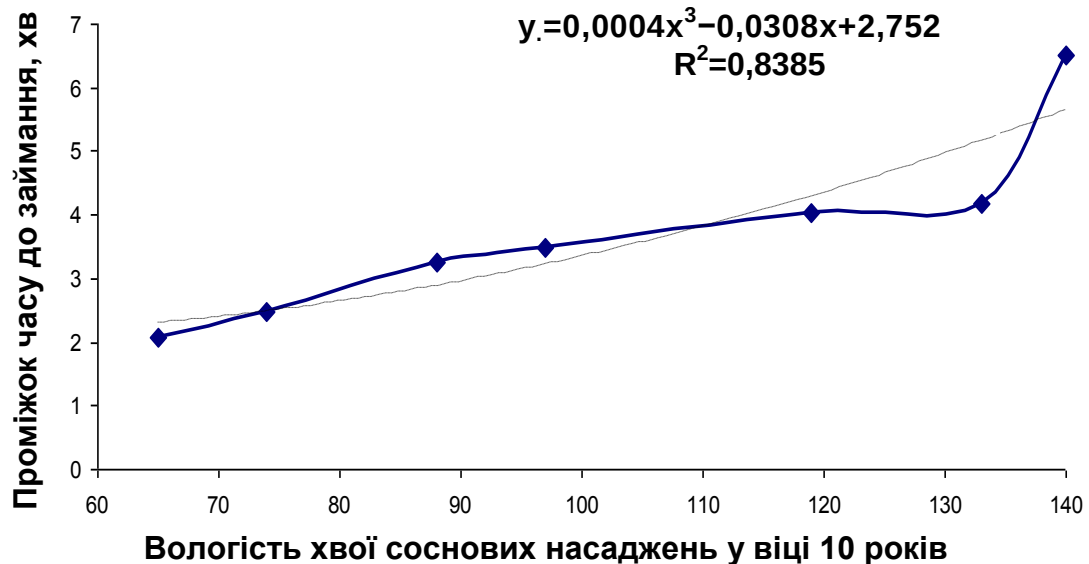


Рисунок 3.8 – Залежність проміжку часу до займання хвої сосни звичайної у віці 10 років від її вологості

Як видно з рис. 3.8, залежність проміжку часу до займання τ_z , хв хвої молодих соснових насаджень від її вологості W , % описується формулою $\tau_z = 0,0004W^3 - 0,0308W + 2,752$ з коефіцієнтом достовірності апроксимації $R^2 = 0,8385$.

Подальшим кроком було дослідження змінення температури займання та проміжку часу до займання розрахунковим методом з використанням поліноміальних регресійних залежностей. У табл. 3.5 наведено результати цих розрахунків, а також результати експериментальних досліджень. На підставі використання таких залежностей встановлено, що значення температури займання та проміжку часу до виникнення займання в залежності від тривалості висушування є близькими до значень, отриманих за результатом експерименту.

Таблиця 3.5

Експериментальні та розрахункові значення температур та проміжку часу до займання свіжозірваної хвої сосни звичайної

Тривалість висушування, доби	Вологість хвої, %	Температури займання, °C / проміжок часу до займання, хв	
		Експериментальні	За поліноміальною регресійною моделлю
0	140	286 / 6,52	287 / 6,35
1	133	281 / 4,18	279 / 4,63
2	119	271 / 4,02	273 / 3,75
3	97	269 / 3,48	269 / 3,37
4	88	266 / 3,25	265 / 3,16
5	74	258 / 2,48	258 / 2,79
6	65	248 / 2,08	248 / 1,95

Як видно з табл. 3.5, розбіжності між експериментальними результатами вимірювання та розрахунковими значеннями практично відсутні і знаходяться в межах похибки вимірювань.

Висушена хвоя, зокрема, яка входить до складу підстилки молодих соснових насаджень, є більш пожежонебезпечною, швидко займається та сприяє поширенню пожеж. Проте високою є і небезпека живої хвої, яка зумовлює швидке поширення верхових пожеж.

3.2. Експериментальні дослідження з виявлення впливу погодних умов на швидкість поширення горіння підстилки соснових молодняків

Експериментальні дослідження з виявлення впливу погодних умов на швидкість поширення горіння підстилки соснових молодняків проводили за методикою, описаною у розділі 2.7. Для дослідження вибрано рівнинні ділянки на території Жовківського р-ну Львівської обл. Слід зазначити, що підстилка

містила суху опалу хвою сосни звичайної та домішки (траву, гілки, кору стовбура тощо). Для запобігання виникненню і поширенню неконтрольованого горіння межі досліджуваних ділянок забезпечили протипожежними перешкодами. Дослідження швидкості вигорання підстилки проводили за відсутності опадів, а також для підстилки, зволоженої шляхом імітації опадів кількістю 2 мм та 4 мм. У випадку опадів кількістю понад 4 мм займання підстилки не відбувалося. Динаміку пройденої вогнем відстані від тривалості горіння хвойної підстилки зображено на рис. 3.9.

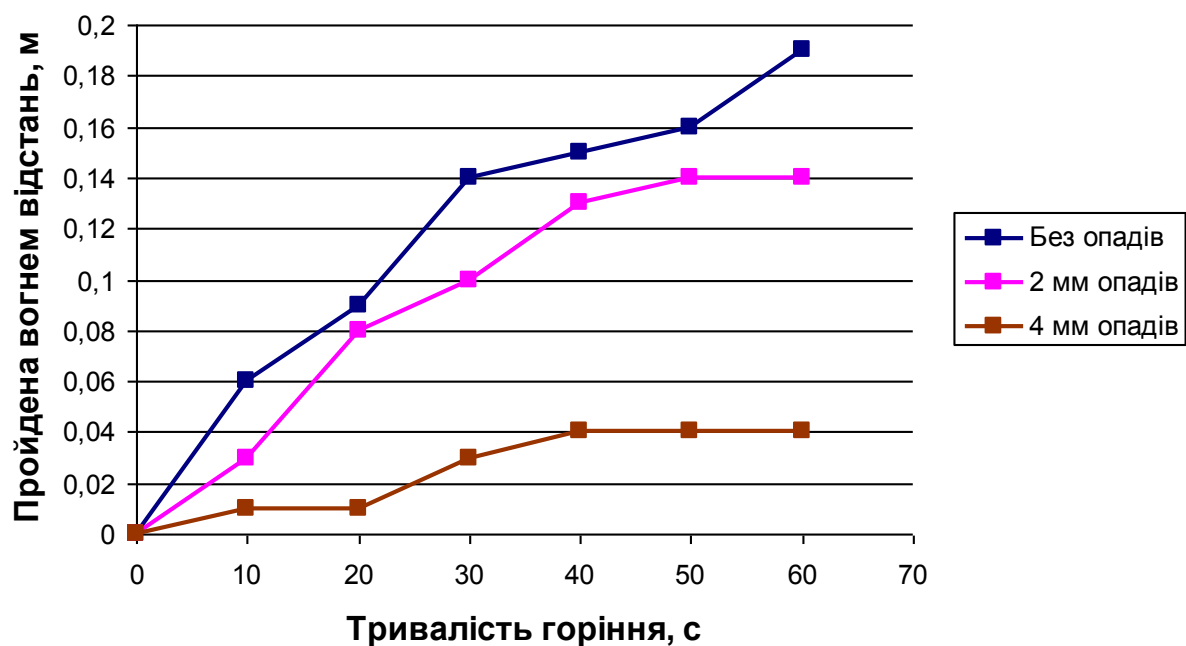


Рисунок 3.9 – Залежність пройденої вогнем відстані від тривалості горіння хвойної підстилки соснових молодняків

Як видно з рис. 3.9, найбільшою є пройдена вогнем відстань для підстилки соснових молодняків за відсутності опадів, а найменша – після опадів кількістю 4 мм. Зокрема, на 60-ій с від початку горіння полум'я у випадку 4 мм опадів поширилось на 0,04 м, а за відсутності опадів – на 0,18 м, що майже в 4 рази перевищує попереднє значення.

За значеннями пройденої вогнем відстані підстилкою соснових молодняків внаслідок її горіння під час імітаційної пожежі обчислили усереднені лінійні швидкості поширення полум'я залежно від наявності або

відсутності опадів, які мають значення 0,0037 м/с; 0,0027 м/с; 0,0013 м/с за відсутності опадів, після опадів 2 мм та 4 мм відповідно. Таким чином, відповідно до проведених досліджень, найбільшою є швидкість полум'я за умов сонячної погоди (за відсутності опадів), середнє значення якої становить 0,0037 м/с та перевищує майже в 3 рази швидкість поширення за умов випадання 4 мм опадів.

3.3. Експериментальні дослідження у польових умовах з виявлення можливості переходу низової лісової пожежі у верхову

Соснові насадження у молодому віці характеризуються малою відстанню нижніх гілок до землі. Зокрема, нижні гілки можуть містити і суху хвою, яка з часом опадає і формує хвойну підстилку. Виникнення низової пожежі в таких насадження може спричинити верхову пожежу, що призведе до значного ушкодження деревостану.

З метою виявлення можливості переходу низової лісової пожежі у верхову проводили експериментальні дослідження в польових умовах, наближених до реальних. Сформували штучну дослідну ділянку соснових молодняків віком до 10 років розмірами 3,0×1,5 м, шляхом пересадження і розміщення на ній хаотичним способом 8-ми дерев різної висоти (рис.3.8), взятих з ділянок сільськогосподарського призначення. Показники метеорологічних умов на момент проведення досліджень, а саме – температуру атмосферного повітря +29°C, атмосферний тиск 734 мм.рт.ст, вітер змінного напрямку 3 м/с – визначили з використанням метеостанції Kestrel 4000. Вологість підстилки визначили за запропонованою методикою, описаною в розділі 2.2. Значення вологості підстилки на момент часу становило $10,3 \pm 0,5\%$. Підстилку на дослідній ділянці формували з опалої хвої соснових молодняків, яку зібрали у лісі поблизу місця її розташування. Товщина підстилки становила не менше 5 мм по периметру дослідної ділянки. Підпалювання здійснювали з використанням запаленого факела довжиною 1,5 м. Одночасно з визначенням часу горіння спостерігали за процесом

поширення низової пожежі підстилкою та можливістю виникнення верхової пожежі. З огляду на ризик неконтрольованого поширення пожежі, експеримент проводили з дотриманням правил пожежної безпеки. На випадок неконтрольованого поширення вогню робочу зону досліджень забезпечили первинними засобами пожежогасіння. Поширення вогню підстилкою розпочалося через 5 с від моменту підпалу. Процес поширення пожежі на 20 с від початку горіння зображено на рис. 3.10.



Рисунок 3.10 – Загальне фото розповсюдження експериментальної пожежі на штучно сформованій ділянці соснових насаджень віком до 10 років на 20-ій с від початку її підпалу

Наявність сухої хвої у складі підстилки сприяла швидкому її займанню та поширенню низової пожежі. Пожежа на 62-ій с перейшла у верхову (рис.3.11), внаслідок чого були охоплені вогнем гілки та хвоя.



Рисунок 3.11 – Загальне фото процесу розповсюдження експериментальної пожежі на штучно сформованій ділянці соснових насаджень віком до 10 років на 62-ій с від початку горіння з переходом низової пожежі у верхову

На 93-ій с пожежа припинилась, спостерігалось тління незгорілої хвої та фрагментів дерев (рис. 3.12). Загальний час пожежі від моменту підпалу до повного її зупинення становив близько 1,5 хв. Дерев, що використовувались для проведення експерименту, мали неоднакові геометричні розміри, тому деякі з них були пошкоджені пожежею лише частково.



Рисунок 3.12 – Загальне фото наслідків пошкодження вогнем штучно сформованої ділянки соснових насаджень віком до 10 років площею $4,5 \text{ м}^2$ внаслідок пожежі тривалістю 93 с

Таким чином, за результатами експериментальних досліджень у польових умовах встановлено, що у разі відсутності трав'яного покриву, за відповідних метеорологічних умов, на 62-ій с низова лісова пожежа перейшла у верхову, спричинивши за 90 с пошкодження соснових насаджень на площі $4,5 \text{ м}^2$.

3.4. Експериментальні дослідження у польових умовах з визначення лінійної швидкості поширення пожежі молодих соснових насаджень віком до 10 років

Пожежна небезпека соснових молодняків, як і будь-якого об'єкта, характеризується багатьма показниками, зокрема наявністю великої кількості горючих матеріалів, шляхів розповсюдження пожежі, а також умов, що ускладнюють її гасіння. Важливою характеристикою є також наявність джерела

займання [67]. Для встановлення факторів впливу на пожежну безпеку використовують низку методик [28]. Найбільш актуальним є дослідження процесів поширення лісової пожежі. Але такі дослідження є складними і становлять небезпеку неконтрольованого поширення вогню. Окрім цього, лісовому середовищу властива значна мінливість типів лісу, структури та різноманітних властивостей, що зумовлює потребу значної кількості досліджень. Тому доцільним є застосування різноманітних моделей, які дають можливість безпечно досліджувати це явище і отримувати результати для різних типів лісу, класів віку та природно-кліматичних умов, що у подальшому допоможе запобігати виникненню та ліквідовувати лісові пожежі.

Важливою передумовою практичного застосування таких моделей є їх перевірка на адекватність порівнянням результатів з реальною пожежею. У разі позитивних результатів такої перевірки модель можна застосовувати для дослідження лісових пожеж в інших насадженнях подібних типів. З урахуванням цього проведено експериментальне дослідження лісової пожежі соснових насаджень молодого віку, результати якого порівняли з результатами комп'ютерного моделювання у WFDS з метою підтвердження подальшого застосування цієї моделі для дослідження пожеж у молодих соснових лісах України.

Експериментальні дослідження у польових умовах з визначення лінійної швидкості поширення пожежі молодих соснових насаджень віком до 10 років проводили влітку 2015 року на території Жовківського р-ну Львівської обл. за методикою, описаною у розділі 2.8. Метеорологічні умови на час проведення досліджень: температура повітря $+33\text{ }^{\circ}\text{C}$, відносна вологість повітря 23 %, вітер змінного напрямку 1 м/с, атмосферний тиск 744 мм рт. ст. [82]. Вологість підстилки, яку визначили з використанням запропонованого методу дієлькометрії, становила $10,11 \pm 2\%$. Підпал здійснювали в трьох місцях. Фотографія ділянки на початку експериментальних досліджень зображена на рис. 3.13.



Рисунок 3.13 – Загальне фото розповсюдження імітаційної пожежі на штучно сформованій ділянці соснових насаджень віком до 10 років на 10-ій с від початку її підпалу

З огляду на підвищену температуру атмосферного повітря підстилка займалася практично миттєво. Температура полум'я під час горіння хвойної підстилки, зафіксована пірметром в місцях поширення пожежі впродовж часу горіння, становила близько $496 \pm 20^\circ\text{C}$. Відсутність атмосферних опадів впродовж останніх 7 днів спричинила низьку вологість ґрунтів у місці дослідження, а це є додатковими чинниками впливу на пожежну небезпеку. Наявність вітру, а також підвищена температура повітря сприяли швидкому поширенню полум'я підстилкою та виникненню низової пожежі уже на 5-ій с після підпалу. Перехід у верхову пожежу спостерігався на 13-ій секунді, причому крони та верхівки насаджень згоряли нерівномірно. Підстилка горіла інтенсивно та практично повністю згоряла. Наявність вітру змінного напрямку

спряла незначній зміні фронту пожежі впродовж усього часу горіння. В процесі експерименту фіксували час та відстань, на яку поширювалось полум'я.

На 60-ій с горіння вогнем пройдено відстань 0,8 м, а на 120-ій – 1,2 м. В цілому горіння насаджень тривало близько 180 с, а по завершенні цього часу подекуди спостерігалось поодинокі догорання окремих фрагментів дерев. Після завершення експерименту використано первинні засоби пожежогасіння для ліквідації окремих осередків загорання, які спостерігалися частково на деревах останніх рядів. Загальне фото пошкодження вогнем штучно сформованої ділянки соснових насаджень віком до 10 років внаслідок пожежі тривалістю 180 с зображено на рис. 3.14.



Рисунок 3.14 – Загальне фото наслідків процесу пошкодження вогнем штучно сформованої ділянки соснових насаджень віком до 10 років внаслідок пожежі тривалістю 180 с

Провівши обробку результатів експериментального дослідження, отримали залежність відстані поширення полум'я від тривалості горіння (рис. 3.15).

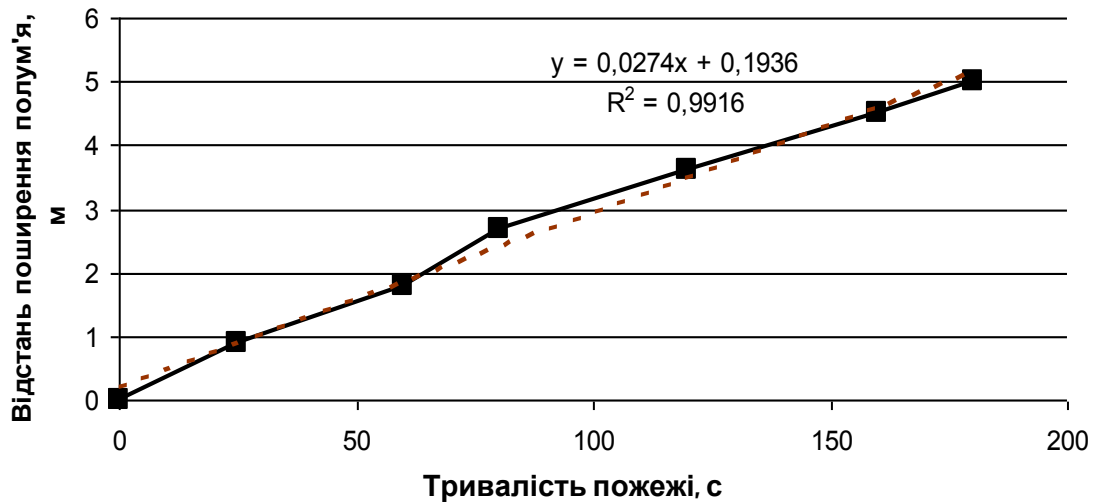


Рисунок 3.15 – Залежність відстані поширення полум'я від тривалості пожежі, отримана за результатами експериментальної пожежі

На наступному етапі досліджень змодельовали цю пожежу у середовищі WFDS та здійснили перевірку адекватності цієї моделі з урахуванням експериментальних результатів. Для побудови комп'ютерної моделі використовували методику, описану в розділі 2.9. На дослідній ділянці перед проведенням експериментальних досліджень були визначені геометричні розміри дерев, зокрема їх висота, висота нижніх гілок над поверхнею ґрунту, діаметр крон та стовбурів (табл. 3.7), а також відносні координати кожного дерева.

Таблиця 3.7

Геометричні параметри соснових насаджень досліджуваної ділянки, на якій проводили експериментальні дослідження з визначення лінійної швидкості поширення пожежі у польових умовах, застосовані для побудови комп'ютерної моделі у WFDS

Висота дерева, см	Відстань від нижньої гілки до поверхні ґрунту, см	Діаметр крони дерева, см	Діаметр стовбура на висоті 1,3 м, см
1	2	3	4
160	10	78	2,10
205	13	117	2,30
150	19	97	2,22
146	18	69	2,15
162	9	83	2,05

Продовження табл. 3.7

1	2	3	4
156	10	57	1,98
156	10	110	2,21
157	7	84	2,18
158	5	92	2,11
138	11	79	2,16
141	28	94	1,90
163	12	101	1,97
157	21	89	2,19
148	10	84	2,15
156	17	91	2,31

В процесі комп'ютерного моделювання у WFDS було автоматично створено файли з результатами. Візуалізацію результатів розрахунку проводили програмою Smokeview, яка дає змогу переглядати перебіг процесу горіння у просторі [47] (рис. 3.16).

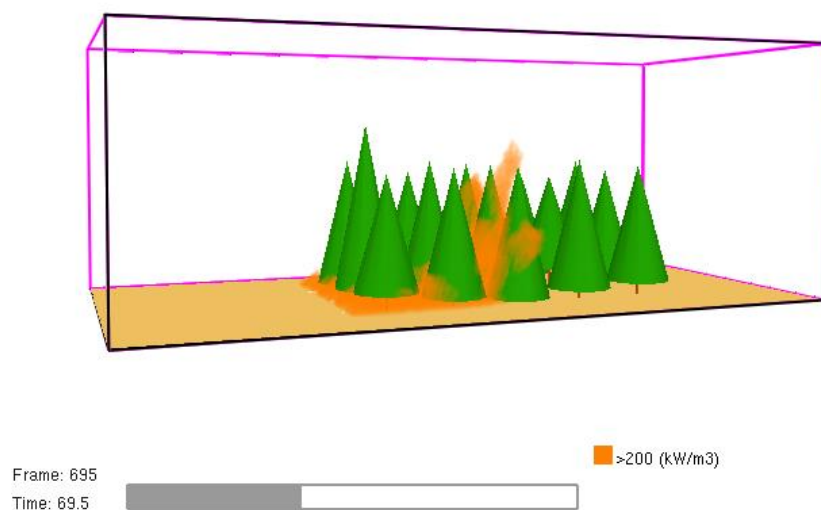


Рисунок 3.16 – Візуалізація результатів моделювання пожежі соснових молодняків у програмі Smokeview із завантаженими макетами дерев

Для оцінювання ступеня згоряння компонентів лісу під час пожежі соснових молодняків, прибрали зображення макетів дерев, замінивши їх з допомогою опцій «Particle files» та «Geometry», які дають змогу змінювати процес згоряння завдяки завантаженню часток Лагранжа, які використовуються у моделі для задання горючого матеріалу рослинного походження.



Рисунок 3.17– Візуалізація результатів моделювання пожежі соснових молодняків у програмі Smokeview із завантаженими частками Лагранжа, які формують структуру горючого матеріалу

Згідно з результатами моделювання, тривалість пожежі становила 170 с, що є близьким до відповідного значення, отриманого під час експериментальних досліджень у польових умовах. Провівши обробку результатів моделювання, визначили залежність відстані поширення полум'я від тривалості горіння (рис. 3.18).

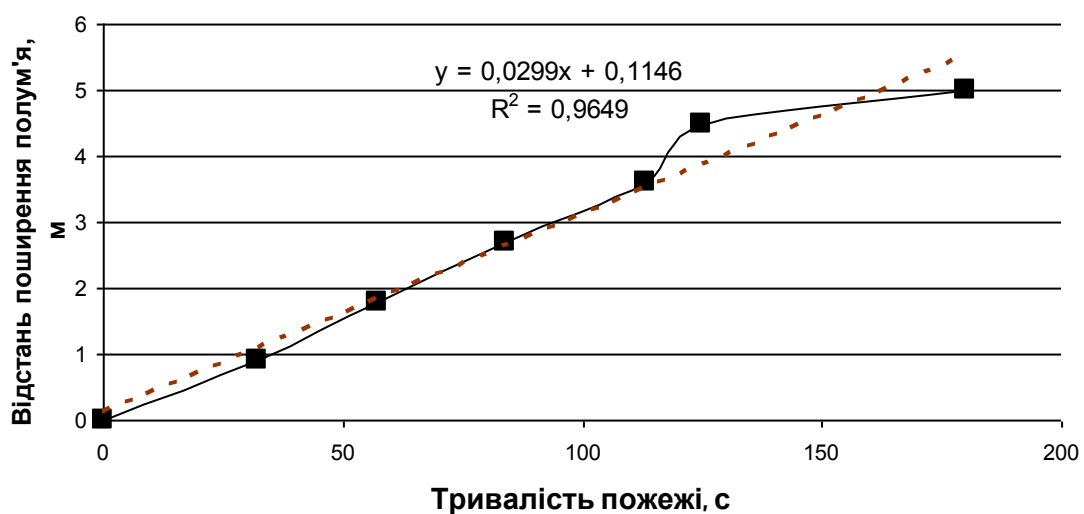


Рисунок 3.18 – Залежність відстані поширення полум'я від тривалості пожежі, отримана за результатами моделювання у WFDS

Отримані залежності за результатами експерименту (див. рис. 3.15) та комп'ютерного моделювання (див. рис. 3.18) є подібними між собою та близькими до лінійних. Це свідчить про те, що лінійна швидкість поширення пожежі є близькою до сталої. В процесі моделювання у WFDS зафіксовано часткове відхилення залежності від прямої внаслідок різкого збільшення з незрозумілої причини інтенсивності горіння в момент поширення полум'я на 4-ий ряд дерев на 120-й секунді горіння, чого не спостерігалось під час експериментального дослідження. А під час експериментальної пожежі вітер на 50-й секунді змінив напрям, спричинивши незначне зниження швидкості поширення полум'я.

За отриманими залежностями пройденої пожежею відстані від тривалості горіння, отриманими експериментально та шляхом комп'ютерного моделювання, отримано лінійні регресійні моделі та обчислено лінійні швидкості поширення пожежі, а також обчислено усереднені значення лінійних швидкостей поширення пожежі та дисперсії (табл. 3.8).

Для перевірки адекватності моделі WFDS експериментальним даним перевірили гіпотезу про рівність дисперсій швидкостей поширення пожежі, отриманих експериментально та за результатами моделювання (табл. 3.8), з використанням критерію Фішера. Емпіричне значення критерію $F_{емп} = 0,0030$ не перевищує критичного значення $F_{\alpha, k_1, k_2} = F_{0,05,5,5} = 5,1$, що свідчить про рівність дисперсій. Оскільки встановлено рівність дисперсій, тоді за t -критерієм Стюдента перевірено гіпотезу про рівність середніх значень швидкостей поширення пожежі. Емпіричне значення критерію $t_{емп} = 0,174$ не перевищує критичне $t_{\alpha, k} = t_{0,05,10} = 2,23$, що свідчить про рівність середніх швидкостей поширення пожежі та адекватність моделі.

Таблиця 3.8

Швидкості поширення пожежі, отримані за результатами експериментальних досліджень та результатами моделювання у WFDS, їх усереднені значення та дисперсії

Вид дослідження	Швидкість поширення пожежі, м/с						Усереднене значення, м/с	Дисперсія, $\text{м}^2/\text{с}^2$
Експеримент	0,0360	0,0300	0,0337	0,0300	0,0281	0,0277	0,0309	0,037
Моделювання	0,0281	0,0315	0,0321	0,0319	0,0360	0,0278	0,0312	0,031

За результатами проведених експериментальних досліджень у польових умовах з виявлення лінійної швидкості поширення пожежі молодих соснових насаджень віком до 10 років встановлено, що розбіжності між експериментальними результатами та розрахунковими значеннями моделі практично відсутні і знаходяться в межах похибки обчислень.

Проведені експериментальні дослідження у польових умовах та моделювання у WFDS підтверджують високу пожежну небезпеку молодих соснових насаджень та швидкий перехід пожежі з низової у верхову. Отримане значення дисперсії швидкості поширення пожежі за результатом експерименту $0,037 \text{ м}^2/\text{с}^2$ практично співпадає зі значенням дисперсії, отриманим за результатами моделювання $0,031 \text{ м}^2/\text{с}^2$, а відповідні усереднені значення швидкості є $0,0309 \text{ м/с}$ і $0,0312 \text{ м/с}$ є близькими, що за відповідними статистичними критеріями підтверджує адекватність цієї моделі та її придатність для застосування в системі забезпечення пожежної безпеки молодих соснових насаджень.

3.5. Дослідження з виявлення впливу змінення компонентів фітомаси молодих соснових насаджень на показники їх пожежної небезпеки

У процесі формування пожежонебезпечного лісового середовища важливе значення має його фітомаса. Фітомасою лісових насаджень вважають

складний і багатогранний результат їх біопродуктивності за окремими компонентами: зелені асимілюючі органи, деревина та кора стовбура, деревина та кора гілок крони, генеративні органи та кореневі системи, що дає змогу вивчати не лише процеси росту деревостану, але й має практичне значення відносно раціонального використання і відтворення лісових ресурсів [57].

Фітомаса соснових насаджень згідно з [57] має структуру, відображену на рис. 3.19.



Рисунок 3.19 – Структурна схема фітомаси соснових насаджень за [57]

Кожен з компонентів фітомаси характеризується вмістом води та здатністю до займання. В процесі розвитку лісу змінюється обсяг фітомаси та співвідношення окремих компонентів, зокрема деревини та кори стовбура, гілок крони, хвої тощо. На накопичення фітомаси соснових молодняків впливають ґрунтові умови, клімат, кількість атмосферних опадів та інші природні фактори. Також має значення рельєф місцевості.

Дослідження обсягу і структури фітомаси лісових насаджень, зокрема сосни звичайної проводять експериментально на дослідних ділянках. За їх

результатами залежно від породного складу насаджень отримано низку моделей [110], які на основі віку та інших показників дають можливість обчислити обсяг фітомаси окремих компонентів. На основі таких моделей проведено дослідження з виявлення впливу змінення компонентів фітомаси молодих соснових насаджень на показники їх пожежної небезпеки. Розрахунок фітомаси здійснювали для соснових молодняків у віці 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 і 40 років. В процесі моделювання визначали конверсійні коефіцієнти, які описуються залежністю [65]:

$$R_v = a_0 \cdot A^a, \quad (3.1)$$

де A – середній вік насадження, років; a_0 та a – коефіцієнти регресії, які встановлені для сосни звичайної в залежності від території, на якій зростає деревостан. Значення a_0 та a для умов України, Білорусі та Грузії наведені у [127]. Розрахунок конверсійних коефіцієнтів R_v здійснювали для таких компонентів фітомаси насадження: $R_{v(k)}$ – крона; $R_{v(x)}$ – хвоя; $R_{v(n)}$ – надземна частина деревостану; $R_{v(n)}$ – підземна частина деревостану. Результати обчислень та загальну фітомасу для соснових насаджень у віці 5–40 років наведено в табл. 3.9.

Таблиця 3.9

Розрахункові значення параметрів фітомаси в соснових насадженнях
залежно від віку

Вік насаджень, роки	$R_{v(k)}$	$R_{v(x)}$	$R_{v(n)}$	$R_{v(n)}$	Запас, $m^3/га$	Фітомаса, $t/га$
5	0,115964	0,042902	0,128588	0,330124	1	1,852734
10	0,08998	0,030888	0,109184	0,368332	1	37,09981
15	0,077571	0,025487	0,09922	0,392701	7	81,51216
20	0,069818	0,022238	0,092707	0,410963	19	129,8685
25	0,064343	0,020006	0,087952	0,425711	41	176,4133
30	0,060189	0,01835	0,084248	0,438152	69	219,9437
35	0,056888	0,017057	0,081238	0,448955	102	260,3831
40	0,054174	0,016011	0,078718	0,458528	137	297,6407

За результатами обчислення параметрів фітомаси соснових насаджень виявили, що значення конверсійних коефіцієнтів R_v для хвої, крони, та підземної частини зменшуються з віком. Проте з віком збільшується надземна фітомаса. А хвоя, яка є основним горючим матеріалом у випадку виникнення і поширення верхових пожеж насадженнями, опадає, формуючи підстилку. Особливості зміни фітомаси соснових насаджень залежно від їх віку зображено на рис. 3.20.

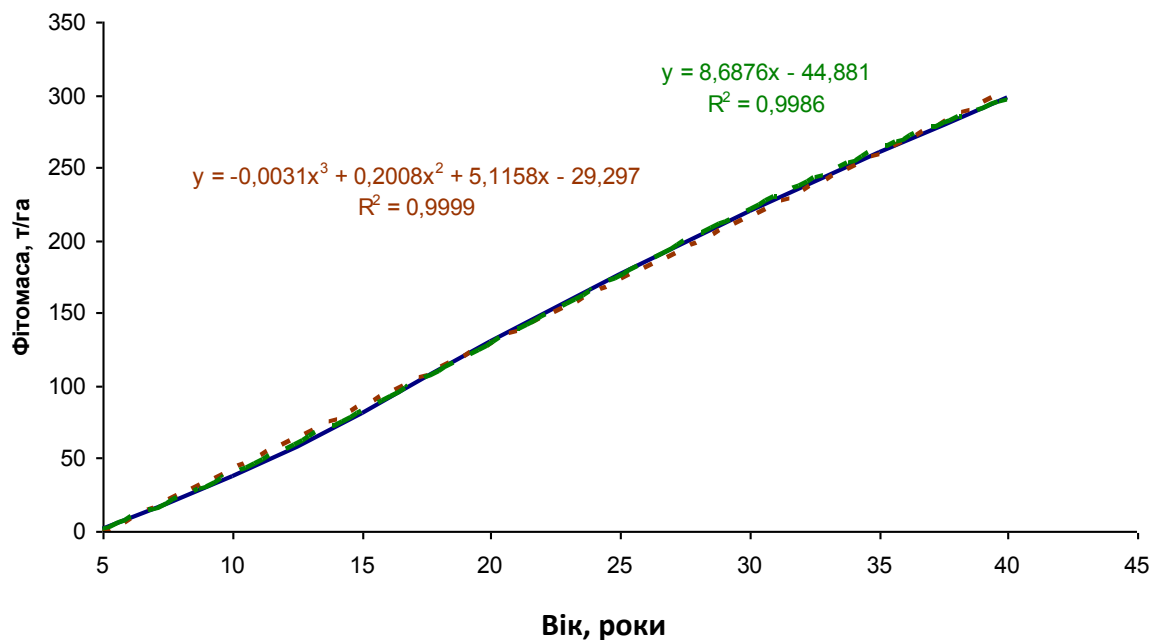


Рисунок 3.20 – Залежність обсягу фітомаси соснових насаджень від їх віку

З рис. 3.20 видно, що загальний вміст фітомаси соснових насадженням збільшується з віком. Збільшення загальної фітомаси y , т/га соснових насаджень описується лінійною регресійною залежністю $y = 8,6876x^2 - 44,881$ ($R^2 = 0,9986$) від віку x , роки, проте більш точне значення дає поліноміальна залежність $y = -0,0031x^3 + 0,2008x^2 + 5,1158x - 29,297$ з коефіцієнтом достовірності апроксимації $R^2 = 0,999$.

Фітомаса соснових насаджень, як і будь-якого деревостану, характеризує сумарний вміст вологи в ньому, що є чинником впливу на пожежну небезпеку. За результатами обчислень фітомаси соснових деревостанів з урахуванням

значень вологості окремих компонентів фітомаси обчислили запас води в надземній частині соснових молодняків (рис. 3.21).

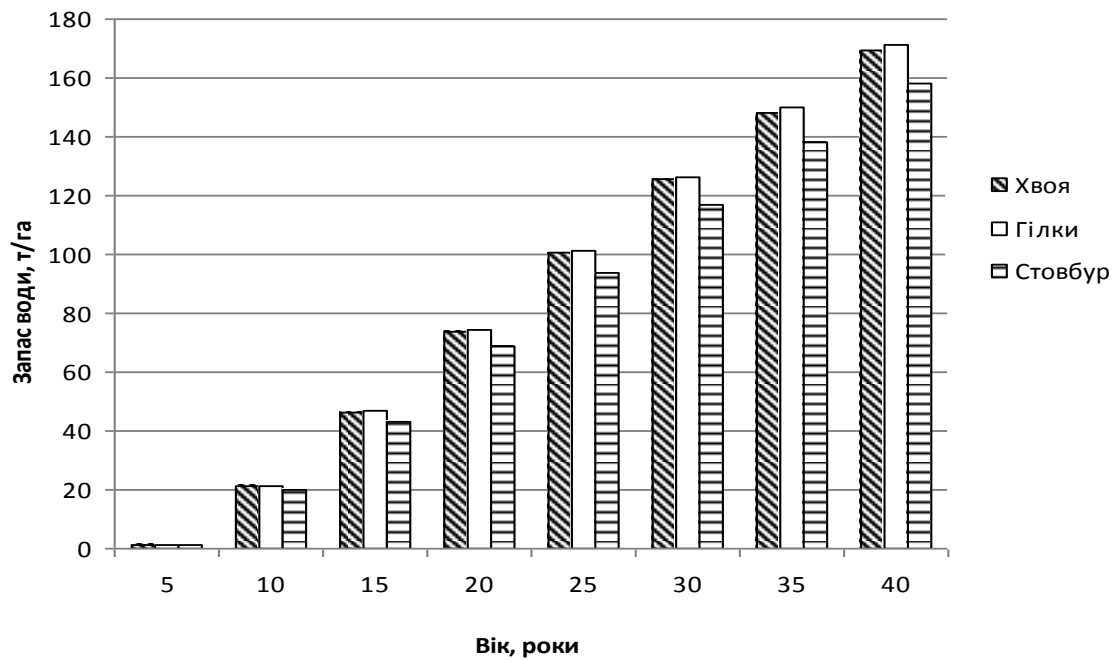


Рисунок 3.21 – Запас води в компонентах надземної частини молодого соснового деревостану

Як видно з рис. 3.21, найменший сумарний запас води в компонентах деревостану властивий насадженням у віці 5 років, найбільший – у віці 40 років. Для хвої та гілок у віці 10 років встановлено однакові значення цього показника на відміну від насаджень старшого віку. Слід відзначити, що для насаджень у віці 10 років значення вмісту води у хвої та гілках є практично однаковими та близьким до вмісту у стовбурів. Зі збільшенням віку деревостанів вміст води у стовбурі дещо зменшується порівняно з хвоєю та гілками, проте загалом він також зростає з віком насадження.

За результатами дослідження з виявлення впливу змінення компонентів фітомаси молодих соснових насаджень на показники їх пожежної небезпеки встановлено, що з віком загальна фітомаса та вміст вологи в соснових насадженнях збільшується, зумовлюючи зменшення пожежної небезпеки.

3.6. Висновки за розділом

3.6.1. Встановлено, що для досліджених зразків хвої молодих соснових насаджень вміст в них органічної горючої рідини, як одного з чинників впливу на пожежну небезпеку соснових насаджень, зменшується в ряду: свіжозірвана віком до 10 років – свіжозірвана віком понад 20 років – опала віком до 10 років та понад 20 років і має значення 2,57%; 2,03% та 1,02% відповідно.

3.6.2. Виявлено, що до 30 с вигорання значення змінення маси зразків різних видів дослідженої хвої практично не відрізняються. Після 30 с вигорання значення маси хвої збільшуються в ряду свіжозірвана–висушена–опала. Встановлено, що значення маси m , г хвої від тривалості її горіння t , с в кюветі змінюються за лінійними регресійними залежностями: $m = -0,0237t + 4,0675$ ($R^2 = 0,9806$) – для свіжозірваної хвої; $m = -0,0373t + 4,1889$ ($R^2 = 0,971$) – для опалої хвої; $m = -0,0365t + 4,1093$ ($R^2 = 0,9933$) – для висушеної хвої.

3.6.3 Встановлено, що залежність температури займання t , °C хвої молодих соснових насаджень від її вологості W , % описується формулою $t = -0,002W^2 + 0,8466W + 204,49$ ($R^2 = 0,9403$), а залежність проміжку часу до займання τ_z , с хвої молодих соснових насаджень від її вологості W , % описується формулою $\tau_z = 0,0004W^3 - 0,0308W + 2,752$ ($R^2 = 0,8385$).

3.6.4. За результатами проведених досліджень виявлено, що найбільшою є швидкість поширення полум'я хвойною підстилкою за умов сонячної погоди (відсутності опадів), середнє значення якої становить 0,0037 м/с та в 3 рази перевищує швидкість поширення за умови випадання 4 мм опадів.

3.6.5. За результатами експериментальних досліджень у польових умовах на дослідній ділянці встановлено, що навіть за відсутності трав'яного покриву, за відповідних метеорологічних умов, на 62-ій с експериментальна низова лісова пожежа перейшла у верхову, спричинивши за 90 с пошкодження соснових насаджень на площі 4,5 м².

3.6.6. За результатами проведених експериментальних досліджень у польових умовах з виявлення лінійної швидкості поширення пожежі молодих соснових насаджень віком до 10 років встановлено, що розбіжності між експериментальними результатами та розрахунковими значеннями моделі практично відсутні і знаходяться в межах похибки обчислень. Усереднені значення лінійних швидкостей є близькими (0,0309 м/с і 0,0312 м/с), що відповідно підтверджує адекватність цієї моделі та її придатність для застосування в системі забезпечення пожежної безпеки молодих соснових насаджень.

3.6.7. Дослідженнями встановлено, що збільшення загальної фітомаси y , т/га соснових насаджень описується лінійною регресійною залежністю $y=8,6876x^2-44,881$ ($R^2=0,9986$) від віку x , роки, проте більш достовірною є поліноміальна залежність $y=-0,0031x^3+0,2008x^2+5,1158x-29,297$ з коефіцієнтом $R^2 = 0,999$.

Результати досліджень опубліковано в [45], [50], [53], [97], [98], [99].

РОЗДІЛ 4

МАТЕМАТИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЗАЙМАННЯ, ВИНИКНЕННЯ ТА ПОШИРЕННЯ ПОЖЕЖ МОЛОДИХ СОСНОВИХ НАСАДЖЕНЬ

4.1. Математичне моделювання процесів займання хвої на початковій стадії пожежі

Лісова пожежа починається з займання горючих матеріалів, які входять до складу дерева чи лісової підстилки. У соснових лісах таким горючим матеріалом найчастіше є хвоя. Хвоя займається здебільшого внаслідок контакту з нагрітим тілом або передавання тепла випромінюванням. Виникнення і поширення лісової пожежі зумовлене процесами теплообміну, зокрема теплопровідністю, конвекцією і радіаційним тепловим випромінюванням [56], [58], [91]. Ці процеси зумовлюють нагрівання кожного виду лісового горючого матеріалу до температури самозаймання або за наявності полум'я до температури займання, внаслідок чого виникає горіння та відбувається поширення вогню. Кожен з видів передавання тепла має свої особливості та може бути описаний у вигляді математичної моделі з використанням диференціальних рівнянь.

4.1.1. Займання хвої внаслідок кондуктивного теплообміну з джерелом тепла

Лісова пожежа на початковій стадії часто виникає від контакту хвої з нагрітим до високої температури тілом, наприклад, жаринкою від багаття, іскрою з вихлопних труб двигунів внутрішнього згоряння, недопалком або іншими предметами. З моменту виникнення контакту з нагрітим тілом розпочинається процес кондуктивного теплообміну [111]. Оскільки товщина хвоїнки є набагато меншою, ніж її довжина, у найпростішому випадку її

нагрівання опишемо одновимірною задачею теплопровідності [58]. Розглянемо два види такої задачі.

1. *Теплопровідність хвоїнки скінченної довжини за відсутності теплообміну на бічній поверхні.* Розглянемо хвоїнку довжини L , м (рис. 4.1).

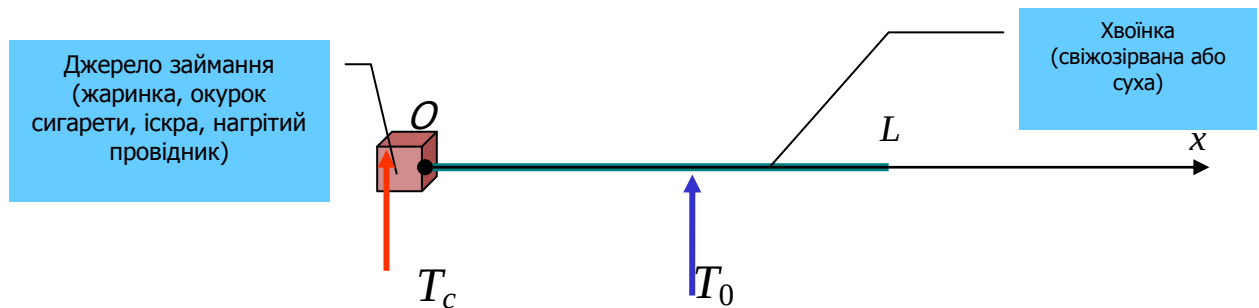


Рисунок 4.1 – Схематичне зображення кондуктивного теплообміну між нагрітим тілом і хвоїнкою

Один з кінців хвоїнки контактує з нагрітим до високої температури T_c , К, тілом. Температура хвоїнки в початковий момент часу є сталою і дорівнює температурі повітря T_0 , К. Така ж температура і кінця хвоїнки, який не контактує з нагрітим тілом. Процес теплопровідності описує диференціальне рівняння

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c\rho} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (4.1)$$

де $T = T(x, \tau)$ – температура хвоїнки у кельвінах в момент часу τ , с, на відстані x м від місця контакту з нагрітим тілом; λ – коефіцієнт теплопровідності хвої, Вт/(м·К); c – її теплоємність, Дж/(кг·К); ρ – густина, кг/м³. Будемо вважати, що нагріте тіло має постійну температуру, теплообмін між повітрям і хвоїнкою не відбувається, а температура іншого кінця хвоїнки є сталою і дорівнює температурі повітря. Початкова та граничні умови мають вигляд:

$$T(x, 0) = T_0, T(0, \tau) = T_c, T(L, \tau) = T_0. \quad (4.2)$$

Сформульована задача теплопровідності (4.1)–(4.2) має аналітичний розв’язок, який описується формулою

$$T(x, \tau) = T_c + (T_0 - T_c) \left(\operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}} \right) - \sum_{n=1}^{\infty} \left(\operatorname{erfc} \left(\frac{2nL + x}{2\sqrt{a\tau}} \right) - \operatorname{erfc} \left(\frac{2nL - x}{2\sqrt{a\tau}} \right) \right) \right), \quad (4.3)$$

де $a = \frac{\lambda}{c\rho}$ – коефіцієнт температуропровідності, $\text{м}^2/\text{с}$; $\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-u^2} du$,

$\operatorname{erfc}(z) = [1 - \operatorname{erf}(z)]$. Побудуємо графіки залежності температури хвоїнки від відстані до її початку – точки контакту з нагрітим тілом в деякі моменти часу. Розглянемо випадки нагрівання живої хвоїнки і сухої, яка входить до складу підстилки. Довжина хвоїнки L становить 0,04 м. Оскільки температура самозаймання живої хвої становить 823 К, тому температура нагрітого тіла T_c повинна перевищувати цей показник і становитиме, наприклад, 840 К. Для сухої хвої температура самозаймання дорівнює 743 К, а температуру T_c візьмемо 760 К. Температура повітря, початкова температура хвоїнки і температура її кінця, який не контактує з нагрітим тілом T_0 в обох випадках дорівнюють 293 К. Фізичні показники обох видів хвої наведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Фізичні показники живої і сухої хвої сосни звичайної

Вид хвої	Вологість, %	Теплопровідність λ , Вт/(м·К)	Теплоємність c , Дж/(кг·К)	Густина ρ , кг/м ³
Жива	140	0,10	1465	670
Суха	12	0,06	1172	460

Значення фізичних показників визначали згідно з літературними даними [42], [91], [123], [139], а також експериментально. Моделювання проводили для свіжозірваної та сухої хвої. Графіки зміни температури хвої обох видів залежно від відстаней до нагрітого джерела наведені на рис. 4.2. та рис. 4.3.

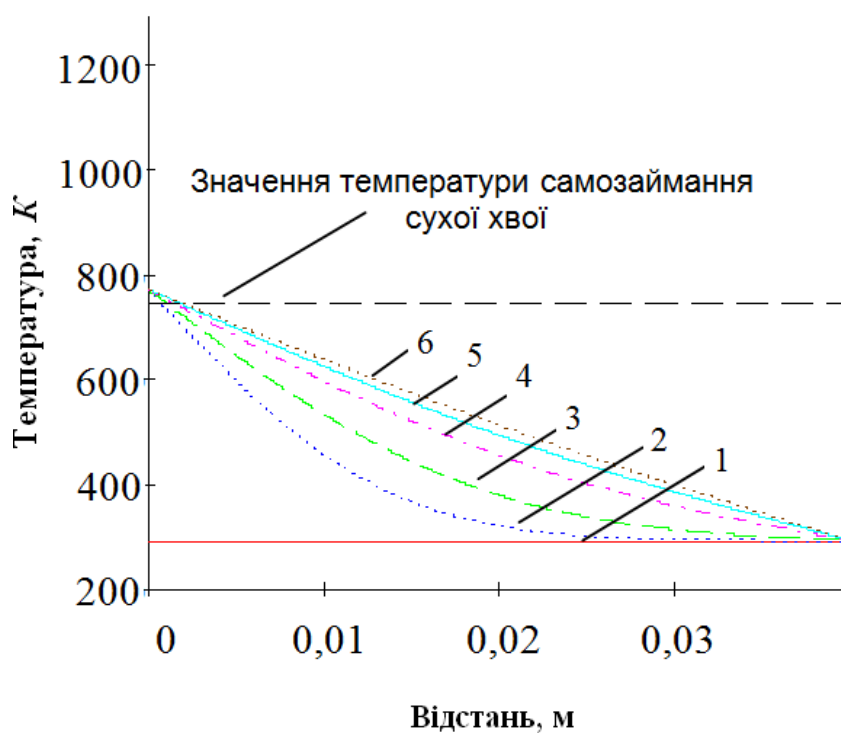


Рисунок 4.2 – Залежність температури сухої хвої від відстані до високотемпературного джерела в моменти часу від початку нагрівання:

1–0 с; 2–50 с; 3–100 с; 4–200 с; 5–300 с; 6–400 с

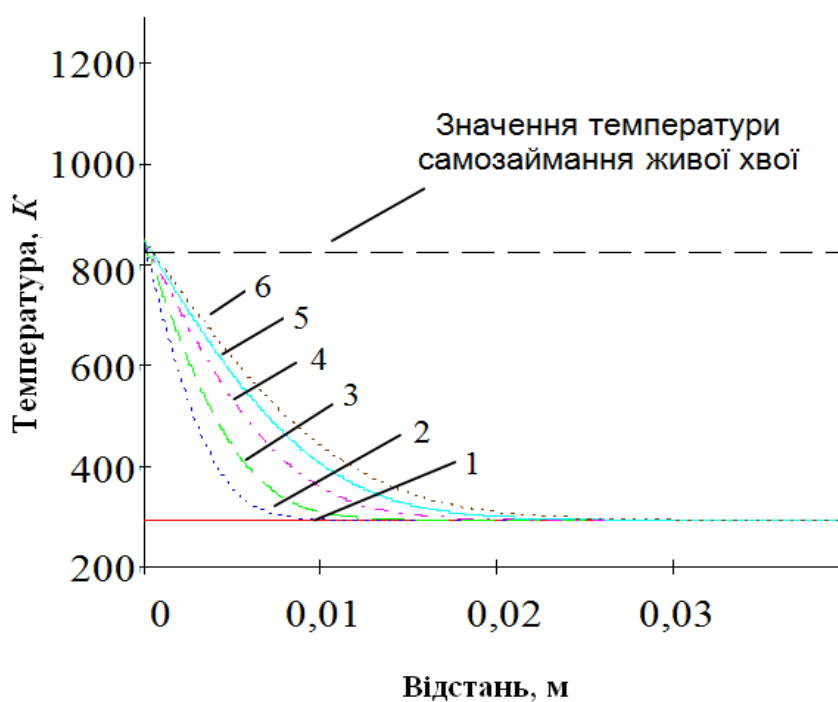


Рисунок 4.3 – Залежність температури живої хвої від відстані до високотемпературного джерела в моменти часу від початку нагрівання:

1–0 с; 2–50 с; 3–100 с; 4–200 с; 5–300 с; 6–400 с

Як видно з рисунків, температура сухої хвої буде зростати швидше, ніж живої, прогріваючи її, наприклад, за 400 с на довжину $2,2 \cdot 10^{-3}$ м у порівнянні з живою – $6 \cdot 10^{-4}$ м. Це зумовить її швидше займання.

2. *Теплопровідність нескінченної хвоїнки за наявності теплообміну на бічній поверхні.*

Вважатимемо, що хвоїнка має нескінченну довжину, її кінець контактує з нагрітим тілом, а на бічній поверхні відбувається конвективний теплообмін з повітрям (рис. 4.4).

Диференціальне рівняння, яке описує процес теплопровідності у цьому випадку, має вигляд

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{\alpha}{c \rho h} (T - T_0), \quad (4.4)$$

де α – коефіцієнт конвективного теплообміну бічної поверхні хвоїнки, Вт/(м²·К). Для хвої $\alpha = 19,8$ Вт/(м²·К) [42].

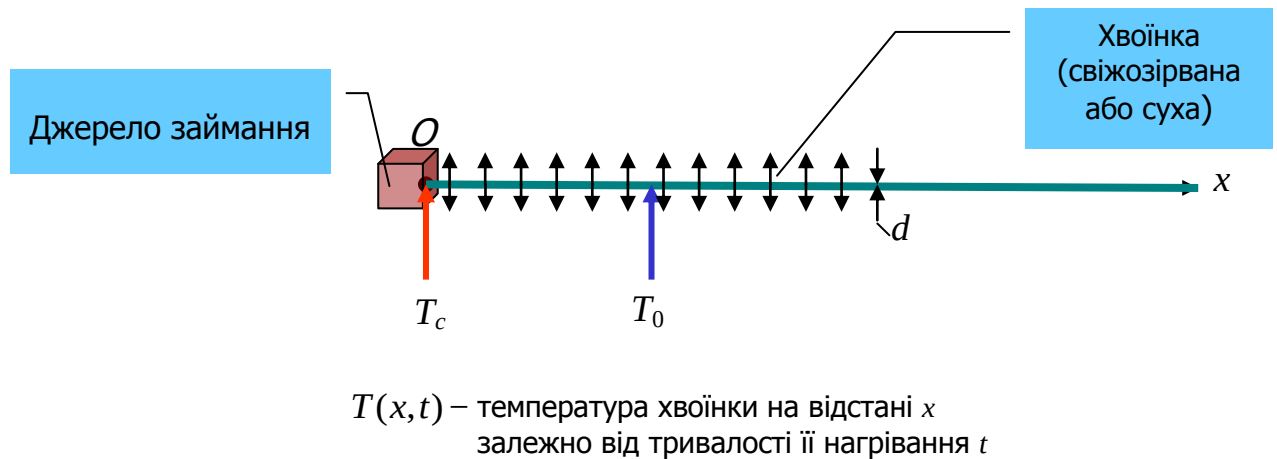


Рисунок 4.4 – Кондуктивний теплообмін між нагрітим тілом і хвоїнкою з тепловіддачею

Початкова та граничні умови мають вигляд:

$$T(x, 0) = T_0, T(0, \tau) = T_c, T(L, \tau) = T_0. \quad (4.5)$$

Сформульована задача теплопровідності (4.4)–(4.5) також має аналітичний розв'язок, який описується формулою

$$T(x, \tau) = T_c + (T_c - T_0) \frac{1}{2} \left(\exp \left(-\sqrt{\frac{\alpha}{\lambda h}} x \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}} - \sqrt{\frac{a\alpha\tau}{\lambda h}} \right) + \exp \left(\sqrt{\frac{\alpha}{\lambda h}} x \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}} + \sqrt{\frac{a\alpha\tau}{\lambda h}} \right) \right), \quad (4.6)$$

де $h = \frac{S}{P}$, S – площа поперечного перерізу хвоїнки, м^2 , а P – довжина твірної, м .

Вважатимемо, що хвоя має форму циліндра з діаметром $d = 2R = 0,001$ м . Тоді

$h = \frac{S}{P} = \frac{1}{2} R = \frac{1}{4} d = 25 \cdot 10^{-5}$ м . Використавши дані табл. 5.3, побудуємо залежності

температур від відстані від високотемпературного джерела для деяких значень часу (рис. 4.5 та рис. 4.6).

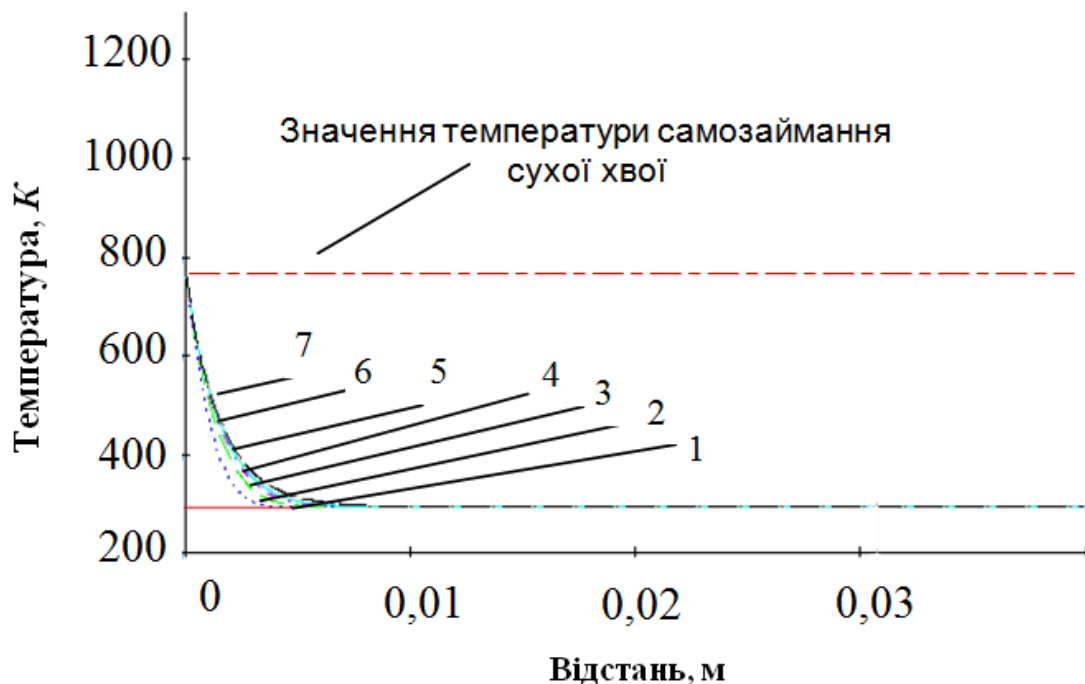


Рисунок 4.5 – Залежність температури сухої хвої від відстані до точки, яка нагрівається тілом з високою температурою з урахуванням теплообміну з повітрям через бічну поверхню в моменти часу від початку нагрівання:

1–0 с; 2–1 с; 3–2 с; 4–3 с; 5–4 с; 6–100 с; 7–400 с

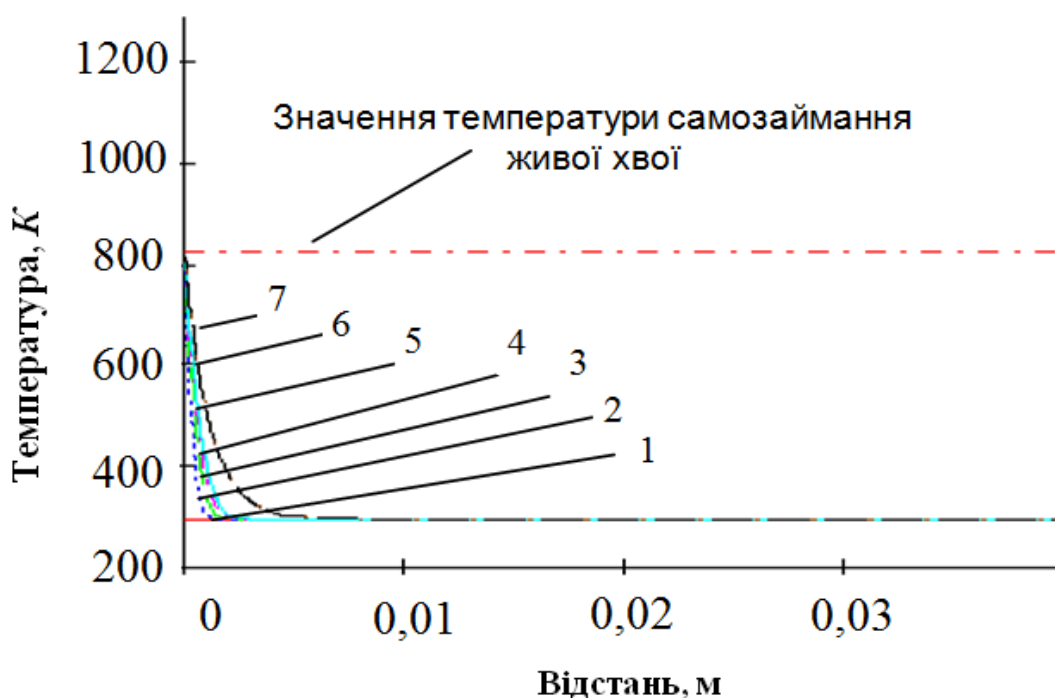


Рисунок 4.6 – Залежність температури живої хвої від відстані до точки, яка нагрівається тілом з високою температурою з урахуванням теплообміну з повітрям через бічну поверхню в моменти часу від початку нагрівання:

1–0 с; 2–1 с; 3–2 с; 4–3 с; 5–4 с; 6–100 с; 7–400 с

Як і в попередньому випадку, тепло буде швидше поширюватися в сухій хвоїнці, зумовивши її швидше займання. Проте у такій моделі внаслідок конвективного теплообміну між бічною поверхнею та повітрям температура живої хвоїнки на відстані 0,006 м і сухої на відстані 0,005 м від місця контакту з нагрітим тілом практично не буде змінюватися, тобто встановиться псевдостационарний стан передавання тепла. А займання буде виникати внаслідок нагрівання невеликого фрагменту хвоїнки до температури самозаймання, довжина якого за 400 с для живої хвоїнки не перевищить $6 \cdot 10^{-3}$ м, а для сухої – $5 \cdot 10^{-3}$ м.

З метою перевірки адекватності математичної моделі в лабораторних умовах проведено експериментальні дослідження з використанням пристрою [78]. Суха хвоя в процесі експерименту займалася і горіла. А у випадку свіжозірваної хвої відбувалося лише тліюче горіння. Результати досліджень наведено в табл. 4.2

Таблиця 4.2

Результати досліджень процесу займання хвої від контакту її кінця з нагрітим тілом.

Вид хвої	№ Досліду	Тривалість нагрівання, с	Температура електро-нагрівального елемента, °С	Займання / довжина обвугленої частини хвоїнки, м
Суха	1	4,0	478	Займання
	2	2,0	466	Займання
	3	2,0	471	Займання
Усереднені значення		2,7±1	471,7±1	
Свіжо-зірвана	1	5,0	454	0,006
	2	5,0	401	0,005
	3	11,0	490	0,009
Усереднені значення		7,0±1	448,3±1	0,0067±1

За результатами експерименту встановлено, що суха хвоя займалась в середньому за 2,7 с від нагрітої до температури 471,7 °С електричної спіралі. Тління свіжозірваної хвої тривало в середньому 7,0 с з моменту контакту з нагрітою до температури 448,3 °С спіраллю та поширилося на відстань 6,7 мм. Займання сухої хвої у всіх дослідах свідчить про її вищу пожежну небезпеку, а поширення обвуглення на незначну відстань підтверджує результати математичного моделювання з урахуванням конвективного теплообміну на її бічній поверхні (рис. 4.4).

Таким чином, за результатами дослідження займання хвої внаслідок нагрівання від контакту з тілом, нагрітим до високої температури, встановлено, що поширення тепла відбувається швидше у сухій хвоїнці, ніж у живій, зумовлюючи за однакові проміжки часу її прогрівання на більшу довжину від точки контакту з нагрітим тілом, що пояснює вищу пожежну небезпеку сухої хвої. При цьому більш адекватною є модель з урахуванням конвективного теплообміну з бічної поверхні хвоїнки.

4.1.2. Займання хвої внаслідок радіаційного теплообміну

У випадку, коли хвоїнка знаходиться на дереві, вона може зайнятися внаслідок радіаційного теплообміну від полум'я низової пожежі [34]. Розглянемо задачу нагрівання хвоїнки до температури самозаймання внаслідок радіаційного теплообміну з підстилкою, яка горить.

Нехай хвоїнка знаходиться на висоті r м від горизонтальної поверхні і проектується в центр прямокутної ділянки довжиною a м і шириною d м, розміри якої значно більші за розміри хвоїнки (рис. 4.7).

Інтенсивність теплового потоку на поверхні хвої описується формулою

$$q = \sigma \varepsilon (T_1^4 - T_2^4) \psi \quad (4.7)$$

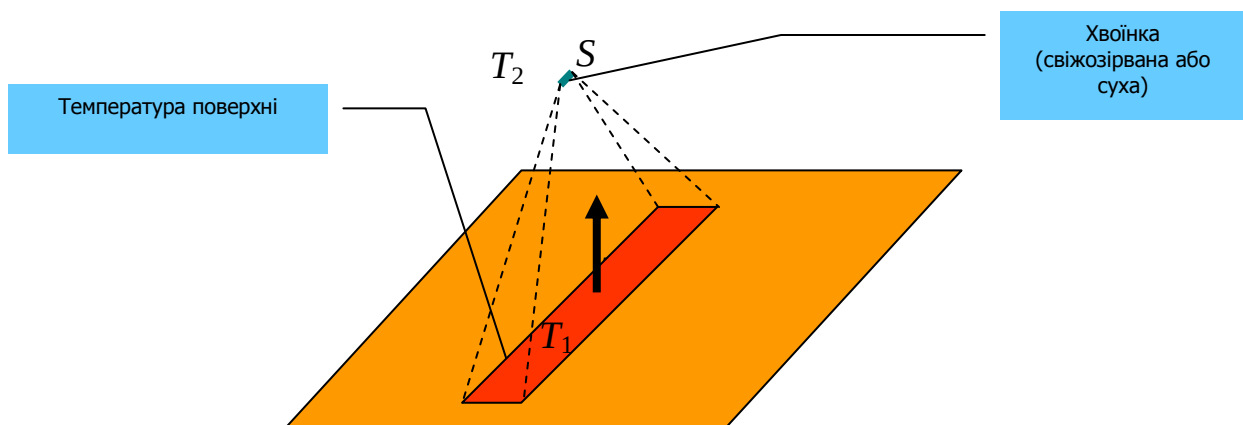


Рисунок 4.7 – Нагрівання хвоїнки внаслідок радіаційного теплообміну з поверхнею прямокутної форми.

де σ – стала Стефана-Больцмана, ε – ступінь чорноти, ψ – середній по поверхні хвої кутівий коефіцієнт опромінення (відповідно до закону Ламберта), T_1 і T_2 – абсолютні температури поверхонь прямокутника і хвоїнки. Для нагрівання хвоїнки з температурою T , поверхня якої площею S , м² опромінюється з поверхні прямокутника сталої температури T_1 (вважатимемо хвою плоскою) протягом часу $d\tau$, буде витрачена кількість теплоти

$$Q = \sigma \varepsilon (T_1^4 - T^4) \psi S d\tau. \quad (4.8)$$

З іншого боку, нагрівання хвоїнки на величину dT , К, описується формулою

$$Q = cm dT, \quad (4.9)$$

де m – маса хвоїнки, кг. Вважаючи, що вся кількість теплоти, отримана випромінюванням, витратиться на нагрівання хвоїнки, прирівняємо праві частини формул (4.8) і (4.9). Отримаємо диференціальне рівняння

$$cm dT = \sigma \varepsilon (T_1^4 - T^4) \psi S d\tau, \quad (4.10)$$

яке описує процес нагрівання хвоїнки до температури $T = T(\tau)$ за час τ . Початковою умовою буде

$$T(0) = T_0, \quad (4.11)$$

де T_0 – температура повітря, К. Коефіцієнт опромінення описується формулою [9]

$$\psi = \frac{2}{\pi} \left(\frac{a}{\sqrt{a^2 + 4h^2}} \operatorname{arctg} \frac{b}{\sqrt{a^2 + 4h^2}} + \frac{b}{\sqrt{b^2 + 4h^2}} \operatorname{arctg} \frac{a}{\sqrt{b^2 + 4h^2}} \right). \quad (4.12)$$

Узагальнений ступінь чорноти

$$\varepsilon = \varepsilon_1 \varepsilon_2 \quad (4.13)$$

визначаємо з урахуванням ступенів чорноти полум'я низової пожежі $\varepsilon_1 = 0,27$ і хвої $\varepsilon_2 = 0,76$ [42]. Тоді $\varepsilon = 0,21$.

Проінтегрувавши (4.10), отримуємо загальний інтеграл

$$\tau = \frac{cm}{\sigma \epsilon \psi S} \frac{1}{4T_1^3} \left(\ln \left| \frac{T_1 + T}{T_1 - T} \right| + 2 \operatorname{arctg} \frac{T}{T_1} \right) + C. \quad (4.14)$$

Врахувавши (4.12) та підставивши початкову умову (4.11) для числових значень $T_0 = 293$ К, $T_1 = 900$ К, $m = 0,002 \cdot 10^{-3}$ кг, $a = 4$ м, $b = 0,1$ м і $h = 5$ м, отримуємо константу для живої хвої $C = -596,3$ с. Це значення застосовуємо для (4.14) та отримуємо функцію

$$\tau(T) = \frac{cm}{\sigma \epsilon \psi S} \frac{1}{4T_1^3} \left(\ln \left| \frac{T_1 + T}{T_1 - T} \right| + 2 \operatorname{arctg} \frac{T}{T_1} \right) - 596,3, \quad (4.15)$$

за якою будуємо графік залежності температури хвоїнки від тривалості нагрівання (рис. 4.8).

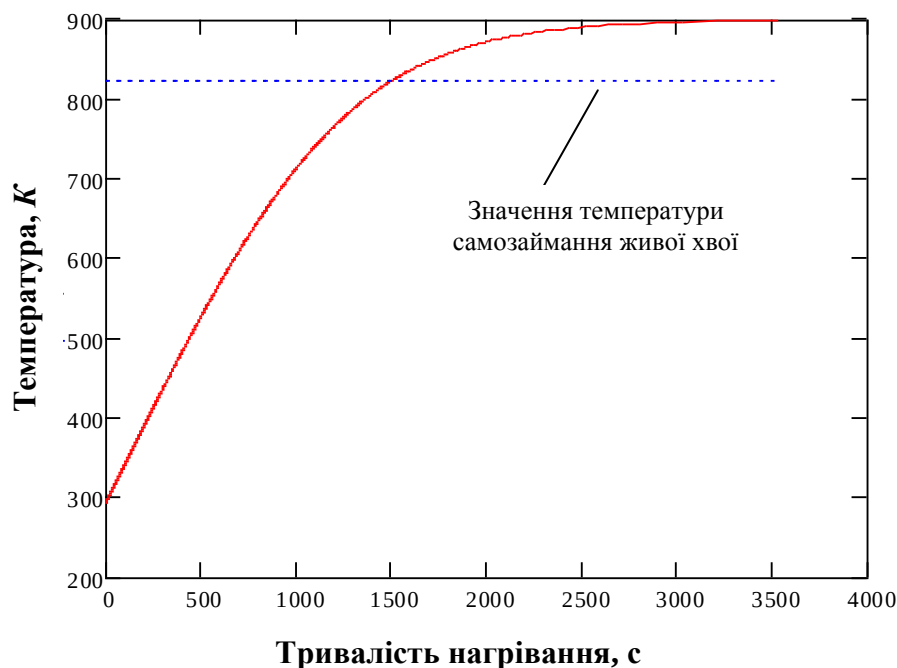


Рисунок 4.8 – Залежність температури живої хвоїнки, розміщеної на висоті 5 м від тривалості внаслідок нагрівання тепловим випромінюванням

З графіка видно, що нагрівання живої хвоїнки до температури самозаймання 823 К буде тривати 1500 с = 25 хв. Результати обчислень цього показника для деяких інших висот наведені в табл. 4.3.

Таблиця 4.3

Тривалість нагрівання живої хвоїнки, розміщеної на висоті h ,
до температури самозаймання 823 К внаслідок радіаційного теплообміну

Висота хвоїнки над поверхнею h , м	Тривалість нагрівання до виникнення горіння, с
1	144,6
2	338,8
3	622,3
4	1008,0
5	1501,0
6	2101,0
10	5586,0
12	7981,0
15	12390,0
20	21910,0

За цими даними отримуємо квадратичну регресійну залежність тривалості нагрівання живої хвоїнки до температури самозаймання внаслідок теплообміну випромінюванням від висоти h

$$\tau(r) = 54,123h^2 + 7,6802h + 103,09 \quad (4.16)$$

з коефіцієнтом детермінації $R^2 = 1$.

Для сухої хвої в кроні дерева коефіцієнт чорноти $\varepsilon_2 = 0,87$ [42] і $\varepsilon = 0,23$, а маса $m = 0,001 \cdot 10^{-3}$ кг. Константа C у (4.14) для сухої хвої на висоті 5 м буде дорівнювати –217 с. Розв'язок задачі (4.10)-(4.11) буде мати вигляд

$$\tau(T) = \frac{cm}{\sigma\varepsilon\psi S} \frac{1}{4T_1^3} \left(\ln \left| \frac{T_1 + T}{T_1 - T} \right| + 2\arctg \frac{T}{T_1} \right) - 217,7, \quad (4.17)$$

а графік цієї залежності зображений на рис. 4.9.

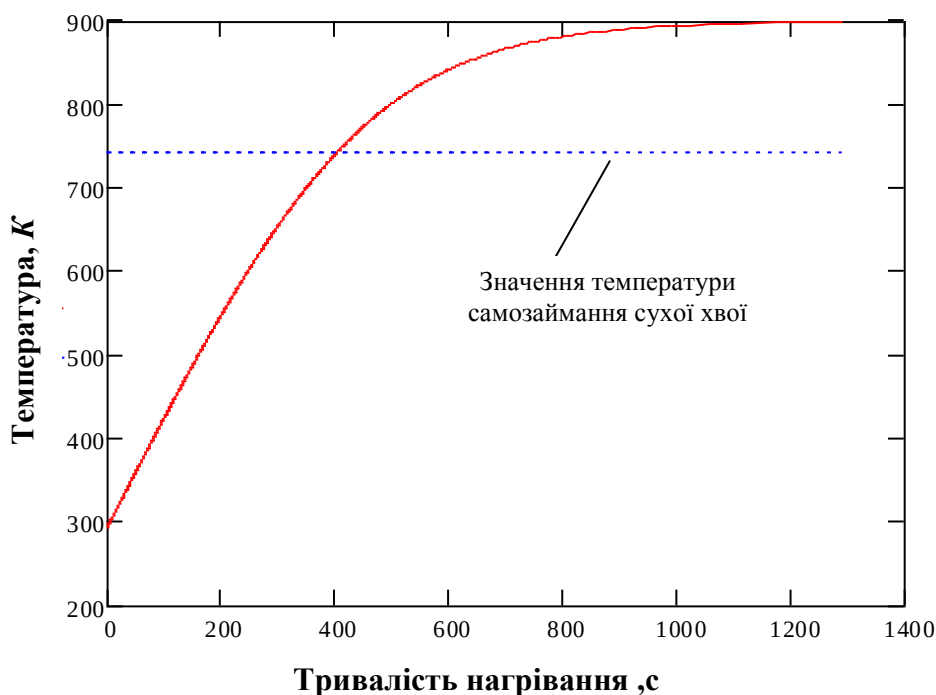


Рисунок 4.9 – Залежність температури сухої хвоїнки, розміщеної на висоті 5 м, від тривалості її нагрівання тепловим випромінюванням

З графіка видно, що нагрівання сухої хвоїнки до температури самозаймання 743 К буде тривати 404 с = 6,7 хв, що майже в 4 рази менше, ніж живої. Обчислені значення тривалості нагрівання сухої хвоїнки до температури самозаймання, яка знаходиться на інших висотах над поверхнею полум'я, наведені в табл. 4.4.

Таблиця 4.4

Тривалість нагрівання сухої хвоїнки, розміщеної на висоті h , до температури самозаймання 743 К внаслідок радіаційного теплообміну

Висота хвоїнки над поверхнею h , м	Тривалість нагрівання до виникнення горіння, с
1	2
1	39,0
2	91,2
3	167,7
4	271,7
5	404,3
6	566,0

Продовження табл. 4.4

1	2
10	1505,0
12	2151,0
15	3338,0
20	5905,0

Регресійна модель тривалості нагрівання сухої хвоїнки в кроні дерева до температури самозаймання внаслідок теплообміну випромінюванням має вигляд

$$\tau(r) = 14,591h^2 + 1,9337h + 28,025 \quad (4.18)$$

з коефіцієнтом детермінації $R^2 = 1$.

Отже, займання сухої хвоїнки в кроні дерева внаслідок теплового випромінювання від полум'я низової пожежі відбуватиметься в 4 рази швидше, ніж живої, зумовлюючи значне зростання пожежонебезпеки за наявності сухої хвої в нижніх гілках крони. Залежності проміжку часу до займання від висоти хвої добре описуються відповідними квадратичними функціями.

4.2. Особливості зміни структури соснових насаджень та самоочищення стовбурів у процесі росту

Ріст соснових насаджень є складним біологічним процесом. На нього впливає велика кількість факторів, зокрема біологічні особливості, походження (природне чи штучне), вік, умови місцезростання (живильні речовини, рельєф, водний режим), кліматичні умови, повнота деревостану та зімкнутість крон, характер розподілу деревостану за ступенем товщини стовбурів, класом росту, величина запасу, лісогосподарські заходи та режим догляду, санітарний стан насаджень, стихійні явища, спадкові властивості деревостану тощо. Важливе значення для росту соснових молодняків має і мінералізація ґрунту, на якому вони зростають [110]. Також у молодняках

вираженою є асиметрія ряду розподілу дерев за ступенями товщини стовбурів [16]. Вплив породного складу і природно-кліматичних зон на величину приросту є відомим, а значення повноти і метеорологічних факторів у літературних джерелах описано недостатньо. Ріст та розвиток кожного дерева характеризуються індивідуальною мінливістю, властивою живим організмам, проте відбувається у складі насадження. Тому в лісівництві важливими є показники, які характеризують не окреме дерево, а деревостан. Система стандартизованих таблиць ходу росту [77] містить дані про основні показники росту повних природних та штучних деревостанів різного бонітету відповідно до типів лісорослинних умов і регіональних кліматичних особливостей. Використовуючи ці дані, можна контролювати та прогнозувати хід росту деревостану у будь-якому регіоні України [77].

Таблиці ходу росту містять інформацію про середній діаметр стовбура, середню висоту, а також густоту та повноту деревостанів, виражених у кількості стовбурів на одиниці площі (га) та сумі площ поперечних перерізів стовбурів у м² на 1 га (табл. 4.5), а від цих показників залежить пожежна небезпека насадження. Висота насадження, повнота і густота зумовлюють не лише просторову структуру насадження, але і формування та зміну товщини шару лісової підстилки та наповнення її матеріалами рослинного походження, які є провідниками горіння. Для штучних і природних деревостанів ці показники визначають за різними таблицями ходу росту. Повнота і густота деревостану є лісівничими показниками [38], проте вони характеризують пожежну небезпеку, оскільки зумовлюють, зокрема, швидкість поширення пожежі та запас горючого матеріалу.

Дані про хід росту деревостану також дають змогу розраховувати і значення параметрів, необхідних для оцінювання фітомаси, загальної кількості горючого навантаження, що характеризують лісове середовище щодо його пожежної небезпеки.

Таблиця 4.5

Хід росту повних штучних соснових деревостанів для Київського Полісся та
Лісостепу України [77]

Вік, роки	Дерево				
	Середня висота, м	Середній діаметр, см	Кількість стовбурів	Сума площ перерізу, м ²	Запас стовбурів, м ³
1	0,1	–	10000	–	–
5	1,2	–	9300	–	3
10	4,4	5,3	8250	18,2	62
15	7,9	8,2	5832	30,8	137
20	11,3	11,0	3893	37,0	218
25	14,4	13,7	2795	41,2	295
30	17,2	16,2	2140	44,1	366
35	19,7	18,6	1704	46,3	431
40	21,9	20,9	1402	48,1	490

Окрім процесів росту та самозрідження в формуванні соснових насаджень має значення і самоочищення нижніх гілок дерева [101]. Вік сосни звичайної характеризує фактична кількість мутовок в складі дерева. Але з ростом у висоту і розростанням крон в ширину відбувається самоочищення нижніх гілок насадження та їх постійне відпадання. Проте впродовж тривалого часу в нижній частині стовбура після відпадання залишаються короткі, а подекуди і довгі залишки гілок у частково сухому стані. Лише у середньовікових та старшого віку деревостанах нижні частини стовбурів переважно не мають гілок та добре очищені від сучків.

Залежність, яка описує висоту нижніх гілок, має вигляд [126]:

$$H = 1 - \exp \left\{ -[a_0(\exp(-a_1 G)) + a_2 H_c^{-1}] \left(\frac{d}{h} \right) \right\}^{a_3} + e, \quad (4.19)$$

де G – абсолютна повнота деревостану, м²/га; H_c – середня висота насаджень, м; d – діаметр дерева на висоті 1,3 м, см; h – висота дерева, м; a_0, a_1, a_2, a_3 – числові

параметри моделі; e – значення похибки. За (4.19), використавши дані таблиць ходу росту [77], отримуємо значення висот нижніх гілок для кожного віку соснових молодняків (табл. 4.6).

Таблиця 4.6

Показники соснових деревостанів та висота нижніх гілок

Вік, роки	Висота деревостану, м	Діаметр, см	Густота, 1/га,	Абсолютна повнота, м ² /га	Відношення висоти крон до висоти стовбурів, м/м	Висота нижніх гілок, м
5	1	2,2	9400	3,57	0,997	0,00
10	4	4,7	8473	14,69	0,779	0,88
15	6,8	6,9	7140	26,68	0,591	2,78
20	9,5	9,1	4497	29,23	0,509	4,66
25	12,1	11,3	3640	36,49	0,427	6,93
30	14,5	13,5	2753	39,39	0,386	8,90
35	16,7	15,6	2182	41,68	0,357	10,73
40	18,7	17,7	1772	43,58	0,336	12,41

Інтенсивність очищення стовбурів у насадженні від гілок та сучків зумовлена не лише механічними пошкодженнями внаслідок змикання гілок сусідніх дерев, але і ступенем затемнення нижніх гілок верхніми. Тривала посуха, нестача вологи у ґрунті, а також характеристики рельєфу місцевості є додатковими факторами, які призводять до погіршення умов зростання і часткового всихання нижніх гілок насаджень, що зумовлює зростання пожежної небезпеки загалом та сприяє переходу низової пожежі у верхову.

4.3. Комп'ютерне моделювання пожежі молодих соснових насаджень

Виникнення та поширення пожеж у лісових насадженнях характеризують різноманітні показники, одним з яких є лінійна швидкість поширення фронту пожежі [29], [35]. Експериментальні дослідження, які проводяться для її визначення із застосуванням відпалів [20], є ефективними, але водночас

становлять значну небезпеку та проводять вкрай рідко. Під час реальних пожеж основним завданням є їх ліквідація, а тому не завжди можна отримати достатню кількість інформації про процеси поширення пожежі. Але оцінити пожежну небезпеку необхідно до виникнення пожежі. Тому актуальним методом досліджень лісових пожеж є комп'ютерне моделювання [66]. Розповсюдження пожежі у лісі є складним для побудови моделі, оскільки на процеси горіння впливають багато чинників, які потрібно врахувати в параметрах моделі. Емпіричні моделі для створення потребують результатів реальних пожеж для кожного конкретного набору таких чинників. Тому для досліджень актуальним є використання фізичних моделей, в основу яких покладено рівняння математичної фізики процесів тепломасообміну в умовах пожежі. До таких моделей належить програмне забезпечення WFDS [144], яке застосовано для досліджень лісових пожеж.

Оскільки моделювання в WFDS з використанням дрібної обчислювальної сітки потребує значних затрат часу за недостатніх ресурсів комп'ютера, тому дослідження [102] проводили для ділянки розміром 6×10 м, на якій розташовували 57 саджанців сосни звичайної в 3 ряди по 19 дерев у кожному. Відстань між деревами у рядах становить 0,5 м, а між рядами – 1,5 м, що відповідає лісівничим вимогам. Моделювання пожежі на цій ділянці проводили для деревостанів віком від 5 до 40 років з кроком 5 років. З використанням таблиць ходу росту повного деревостану [77] розраховували лісівничі характеристики, необхідні для дослідження (табл. 4.7).

Таблиця 4.7

Лісотаксаційні показники соснових насаджень в процесі росту [77]

Вік, роки	Висота, м	Густота, 1/га	Абсолютна повнота, га	Діаметр стовбура, см
1	2	3	4	5
5	1	12596	9400	1
10	4	8473	8473	4,7

Продовження табл. 4.7

1	2	3	4	5
15	6,8	7140	7140	6,9
20	9,5	4497	4497	9,1
25	12,1	3640	3640	11,3
30	14,5	2753	2753	13,5
35	16,7	2182	2182	15,6
40	17,7	1772	1772	17,7

В процесі росту поряд зі збільшенням висоти відбувається зменшення кількості дерев внаслідок самозрідження насадження, для імітації якого використовували генератор випадкових чисел. Оскільки змикання крон між рядами завершується у віці 10 років, спричиняючи майже повне зникнення трав'яного покриття [39–40], для ділянок віком 5 років наземним горючим матеріалом вибирали трав'яне покриття, а починаючи з 10 років – хвойну підстилку. Схеми розташування дерев відповідного віку на дослідній ділянці зображено на рис. 4.10 – 4.12.

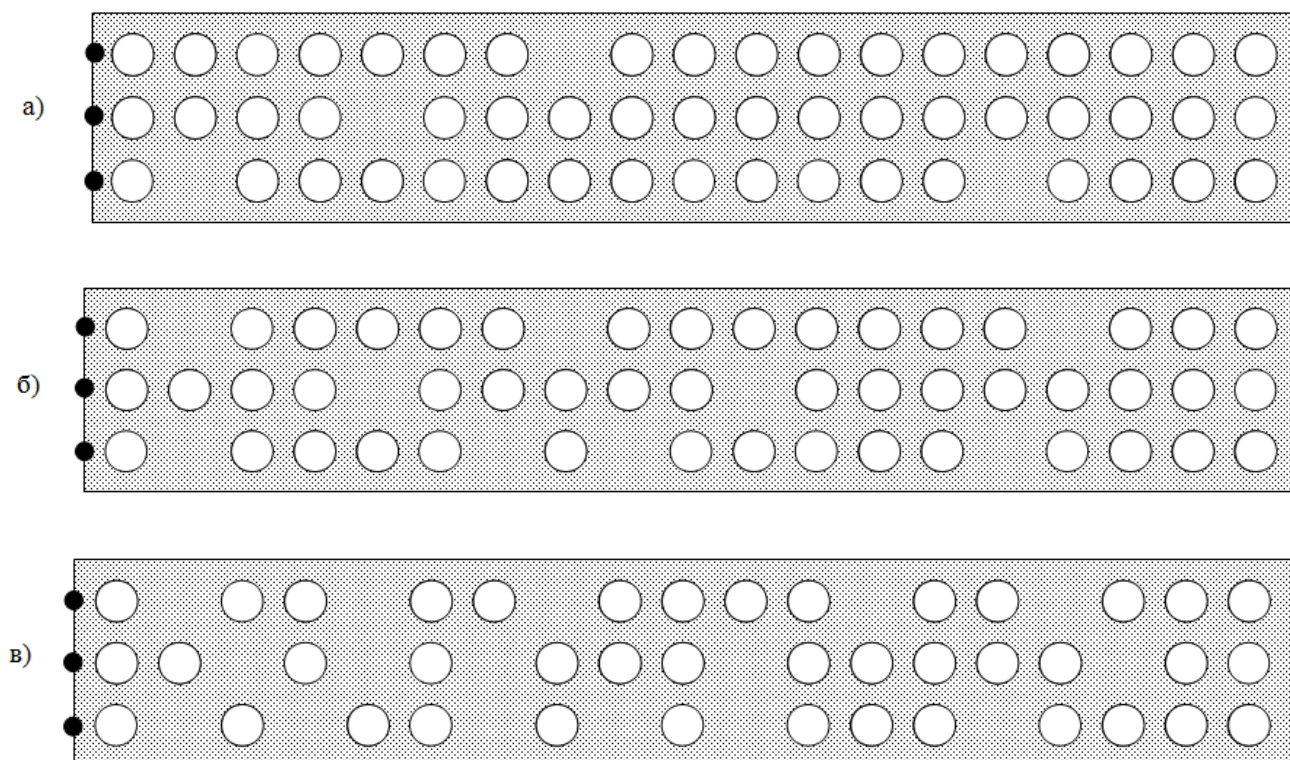


Рисунок 4.10 – Схеми дослідної ділянки соснового деревостану:

а – вік 5 років (53 дерева); б – вік 10 років (48 дерев); в – вік 15 років (41 дерево)

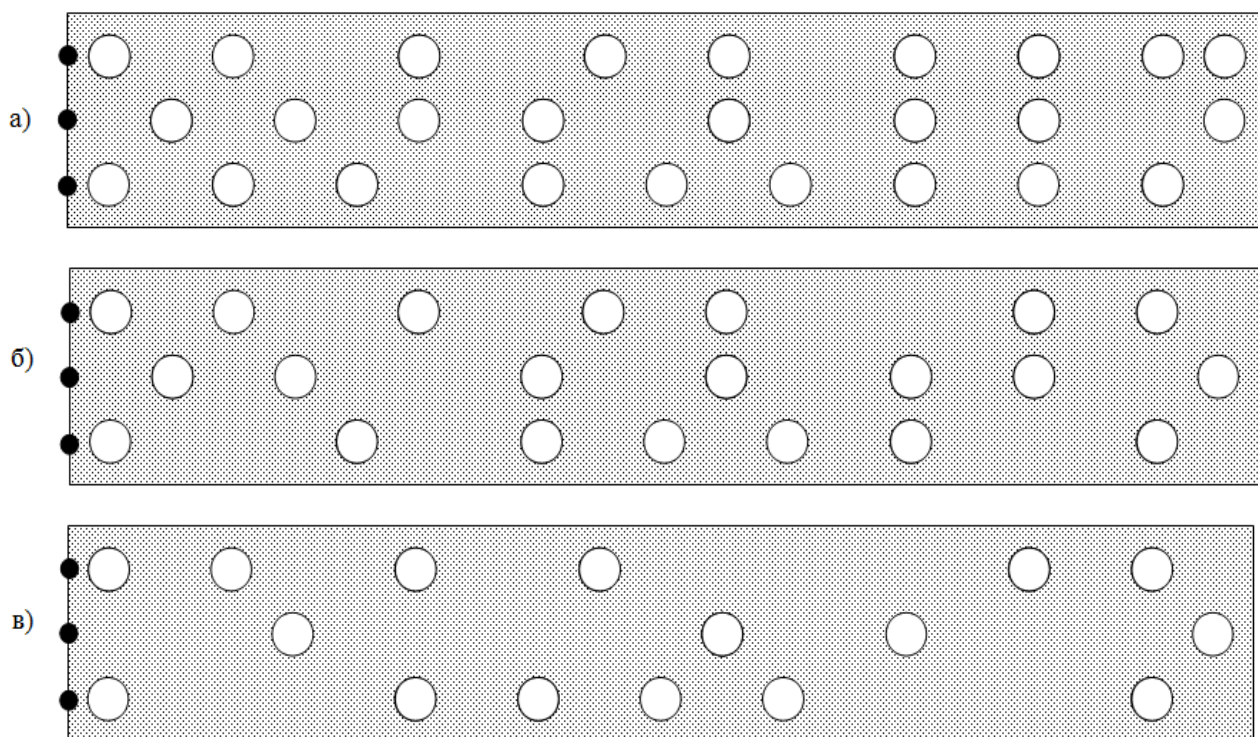


Рисунок 4.11 – Схеми дослідної ділянки соснового деревостану:

а – вік 20 років (26 дерев); б – вік 25 років (21 дерево); в – вік 30 років (16 дерев)

Як видно з рис. 4.10 та рис. 4.11, внаслідок моделювання у віці 5 років кількість насаджень перевищує в 1,3 разів це значення порівняно з ділянкою у віці 5 років.

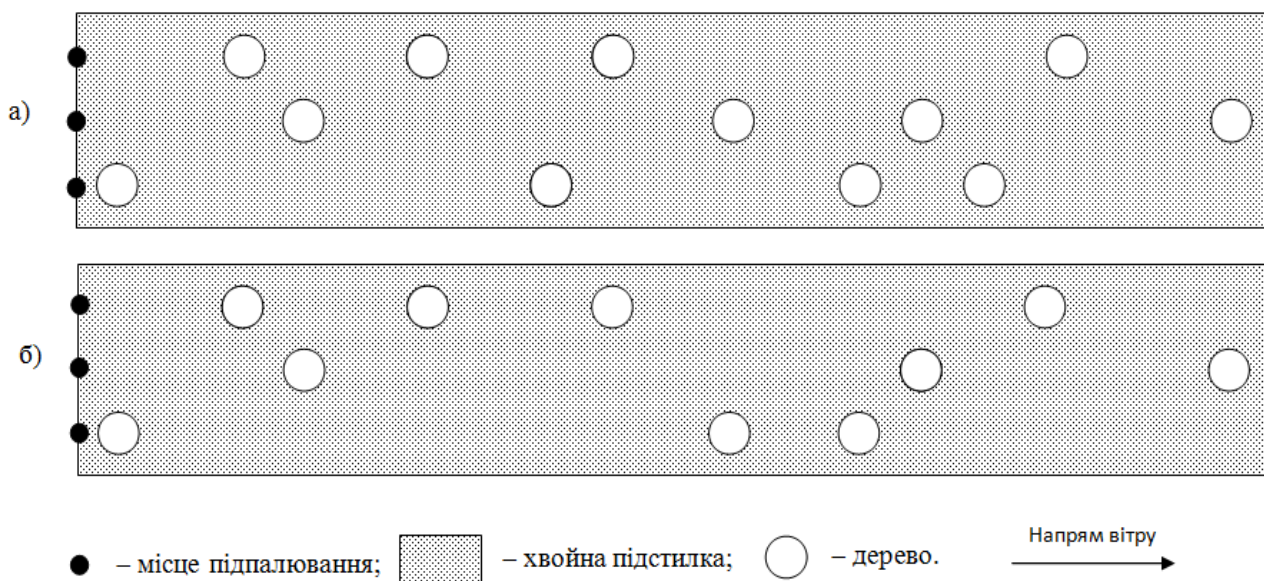


Рисунок 4.12 – Схеми дослідної ділянки соснового деревостану відповідного віку:

а – вік 35 років (12 дерев); б – вік 40 років (10 дерев)

Для проведення моделювання в WFDS необхідно задати фізичні властивості горючих матеріалів на ділянці, зокрема, координати і геометричні розміри дерев та шару підстилки, вологість, щільність, насипну щільність, відношення площі поверхні до об'єму, а також початкову температуру. В процесі росту внаслідок змикання крон відбувається самоочищення нижніх гілок деревостану, призводячи до зростання висоти нижніх гілок від поверхні ґрунту. Обчислення проводили за такими показниками, як густота, повнота насаджень, діаметри крон, стовбурів, вік і висота деревостану. Геометричні розміри, форми крон та кількість дерев на дослідній ділянці, використані для моделювання у WFDS, наведені в табл. 4.8.

Таблиця 4.8

Геометричні розміри, форми крон та кількість дерев на дослідній ділянці

Вік, роки	Висота, м	Форма крони	Діаметр стовбура на рівні ґрунту, м	Діаметр крони, м	Висота нижніх гілок, м	Кількість дерев, од.
5	1,0	конус	0,03	0,02	0,0	53
10	4,0	конус	0,07	0,06	0,8	48
15	6,8	конус	0,11	0,09	2,8	41
20	9,5	зрізаний конус	0,14	0,12	4,7	26
25	12,1	зрізаний конус	0,17	0,15	6,9	21
30	14,5	зрізаний конус	0,19	0,17	8,9	16
35	16,7	зрізаний конус	0,19	0,17	10,7	12
40	18,7	зрізаний конус	0,20	0,19	12,4	10

Форму крон дерев 5-15-річного віку вважали конічною, а з 20-річного віку – зрізаного конуса. Стовбур вважали конусом з висотою, що дорівнює висоті дерева, та діаметром на рівні ґрунту. Підпал здійснювали в трьох місцях (рис. 4.10 – 4.12). Згідно з результатами моделювання для насаджень віком 5 років з живою травою, після запалювання, вогонь розповсюдився лише у межах 1-го ряду, після чого горіння припинилося. Виникнення верхової пожежі, а також подальшого поширення низової не відбувалося, тому подальші дослідження проводили для сухої трави.

Результати пробного моделювання пожежі соснових насаджень за швидкості вітру до 1 м/с показали, що поширення полум'я підстилкою відбувається дуже повільно, тому основні дослідження проводили для швидкості вітру 2 м/с. Під час моделювання пожежі соснових молодняків визначали момент переходу низової пожежі у верхову та швидкість поширення низової та верхової пожежі.

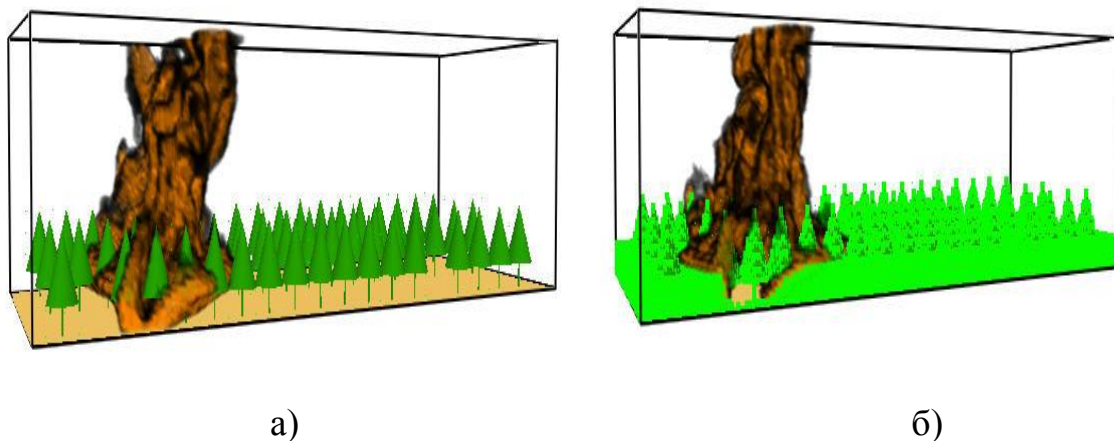


Рисунок 4.13 – Візуалізація процесу моделювання соснових молодняків у віці 5 років: а – з завантаженими макетами дерев; б – з завантаженням часток Лагранжа

Моделювання проводили на сітці розмірами $200 \times 120 \times 100$ з параметрами домену $10 \times 6 \times 5$ м. На рис. 4.13а видно момент, коли пожежа, що розповсюджувалась підстилкою, поступово переходить у верхову. Задавши відповідним чином параметри середовища Smokeview, з використанням контекстного меню, отримано відображення не лише процесу горіння, але і вигорання трави, заданої шаром відповідної товщини, а також крон, відображених часточками Лагранжа, які формують структуру лісового горючого матеріалу (рис. 4.13б). Відповідний режим перегляду структури насаджень в інтерфейсі Smokeview відображає поступове вигорання горючого матеріалу за його зникненням водночас з поширенням пожежі ділянкою. Майже абсолютно згорає трава, хвоя, що утримується на кронах, а також частково стовбури.

Аналогічний процес моделювання пожежі проведено і для соснових молодняків у віці 10 років (рис. 4.14). Проте у цьому випадку наземним горючим

матеріалом є не суха трава, а суха опала хвоя, яка є основним горючим компонентом лісової підстилки. Товщину хвойної підстилки встановлювали за даними спостережень у польових умовах. У зв'язку із зростанням висоти дерев з віком, збільшували висоту обчислювального домену таким чином, щоб структура деревостану не перетинала межі домену. Якщо цього не зробити, то моделювання не відбуватиметься, а процес горіння, як свідчать результати тестового запуску Smokeview під час досліджень, припиняється і має тенденцію до згасання.

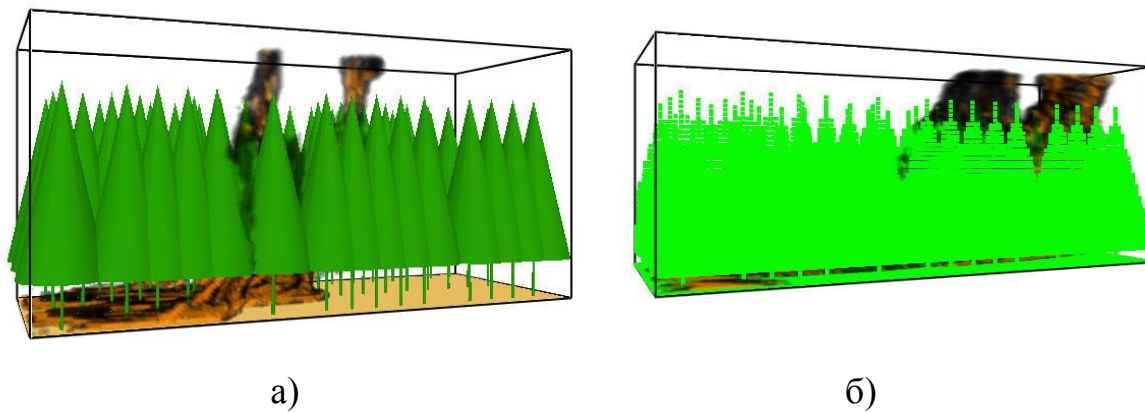


Рисунок 4.14 – Візуалізація процесу моделювання соснових молодняків у віці 10 років:

а – з завантаженими макетами дерев; б – з завантаженням часток Лагранжа

За умов моделювання соснових молодняків у віці 10 років основними відмінностями щодо геометричних параметрів є кількість дерев, їх висота, а також висота нижніх гілок на рівні землі. Основним горючим матеріалом підстилки є суха опала хвоя. Виникнення верхової пожежі спостерігається з 6 ряду, після чого верхова пожежа розповсюджується по всьому фронту за напрямком вітру і одночасно в протилежному напрямку.

Процес моделювання пожежі соснових молодняків у віці 15 років, окрім відмінностей геометричних параметрів дерев та їх кількості, характеризується застосуванням двох сіток з розмірами $10 \times 6 \times 1$ м (початок від поверхні ґрунту) та $10 \times 6 \times 9$ м (початок з висоти 1 м над поверхнею ґрунту). Візуалізацію перебігу процесу моделювання для соснових молодняків у віці 15 років зображено на рис. 4.15.

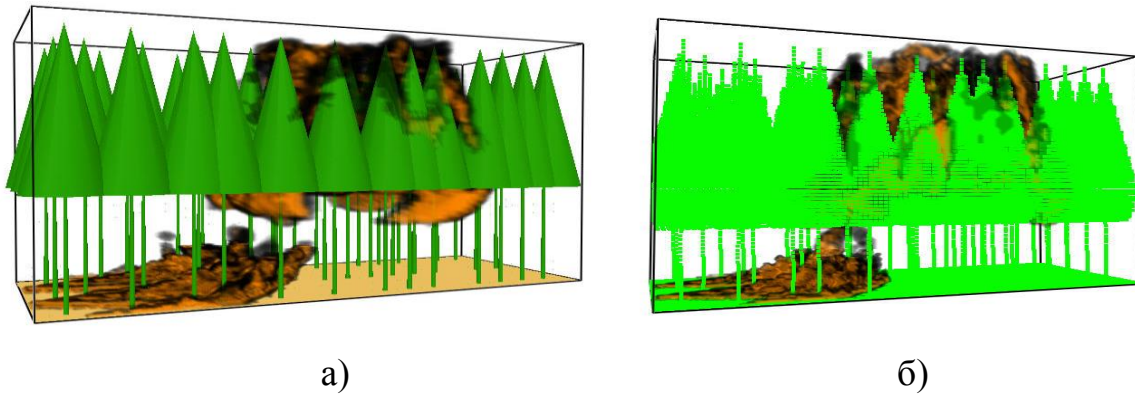


Рисунок 4.15 – Візуалізація процесу моделювання соснових молодняків у віці 15 років: а – з завантаженими макетами дерев; б – з завантаженням часток Лагранжа.

Для моделювання пожежі соснових молодняків 20-річного віку задавали параметри, як і для 15-річних. Проте характерною особливістю у цьому випадку є значне зменшення кількості дерев у порівнянні з насадженнями у віці 15 років. Також задавали в нижній частині крони гілки в сухому стані, що відповідає результатам польових досліджень та збільшує небезпеку переходу пожежі у верхову форму. На рис. 4.16 зображено процес моделювання соснових молодняків у віці 20 років за наявності сухих гілок.

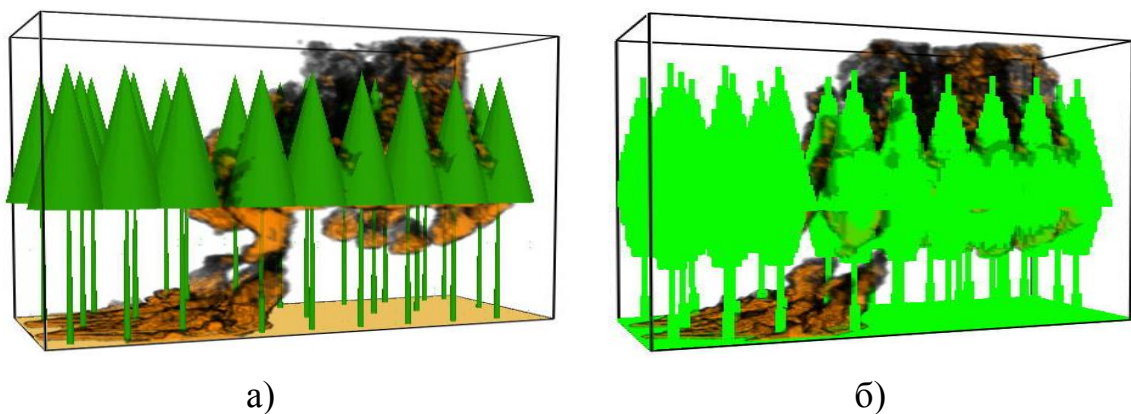


Рисунок 4.16 – Візуалізація процесу моделювання соснових молодняків у віці 20 років з врахуванням сухих гілок: а – з завантаженими макетами дерев; б – з завантаженням часток Лагранжа.

Як і у випадку 15-річних насаджень, відбувається перехід низової пожежі у верхову. А за відсутності сухих гілок у насадженні соснових молодняків віком 20 р. відбувається лише низова пожежа (рис. 4.17).

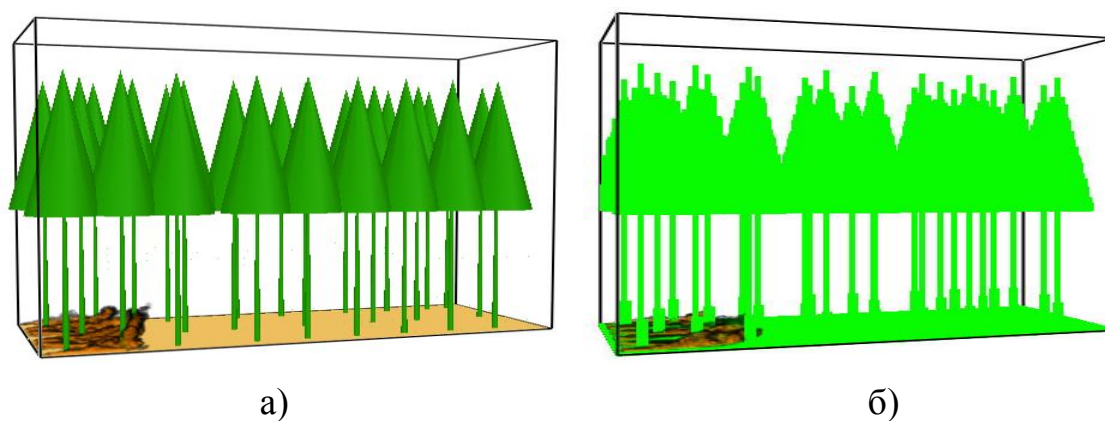


Рисунок 4.17 – Візуалізація процесу моделювання соснових молодняків у віці 20 років без врахування наявності сухих гілок: а – з завантаженими макетами дерев; б – з завантаженням часток Лагранжа.

Процес моделювання соснових насаджень у віці 25 років характеризується виникненням і поширенням лише низової пожежі. У даному випадку горіння крон дерев не відбувається (рис. 4.18)

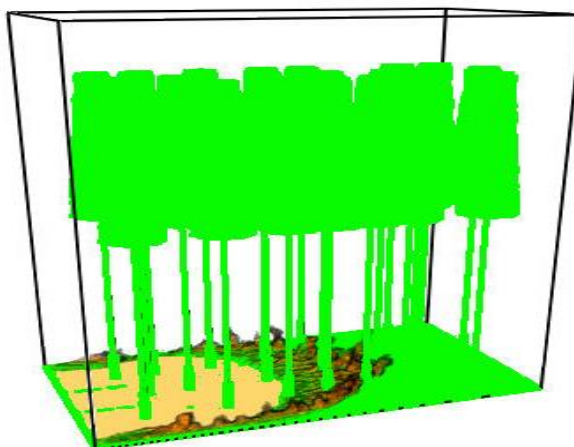


Рисунок 4.18 – Візуалізація процесу моделювання соснових молодняків у віці 25 років

В процесі моделювання пожежі соснових насаджень у віці 30, 35 і 40 значення висоти нижніх гілок крони від рівня ґрунту було ще більшим, ніж для молодшого віку. І у всіх випадках пожежа розповсюджується підстилкою (рис. 4.19). Зауважимо, що внаслідок самозрідження в насадженні віком 40-років залишається всього 9 дерев (рис 4.19в).

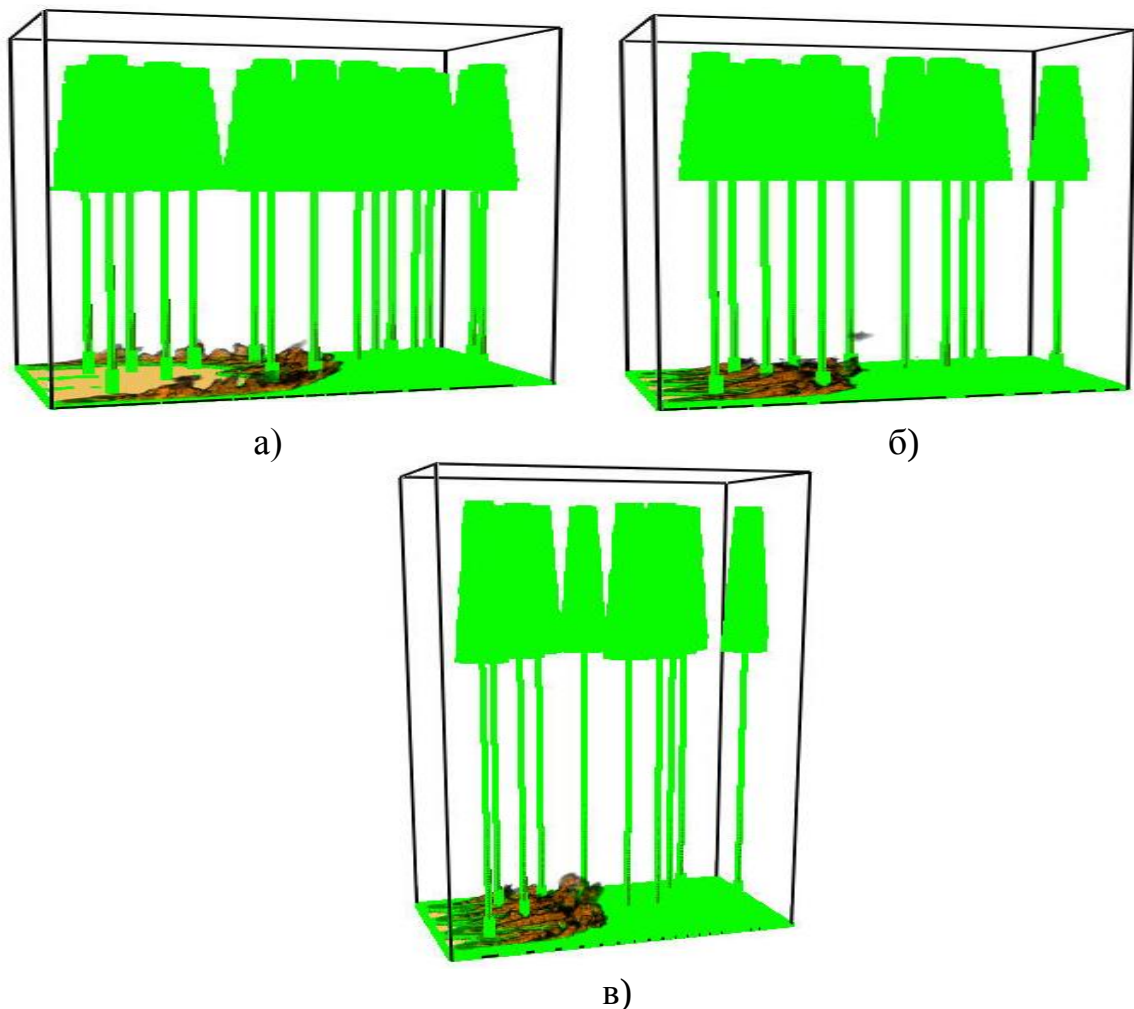


Рисунок 4.19 – Візуалізація процесу моделювання соснових молодняків у віці: а – 30 років; б – 35 років; в – 40 років

Під час моделювання враховували і швидкість вітру. З цією метою процес моделювання здійснювали за швидкостей 1, 2, 4, і 6 м/с.

За результатами моделювання обчислили значення середньої швидкості поширення низової та верхової пожежі (табл. 4.9).

Таблиця 4.9

Середня швидкість поширення пожежі за результатами моделювання на пробній ділянці, м/хв

Вид пожежі	Швидкість вітру, м/с	Вік, роки							
		5	10	15	20	25	30	35	40
Низова	1	-	8,34	3,18	2,16	2,46	1,68	2,52	1,98
	2	-	3,66	5,46	5,16	4,98	6,36	7,86	8,82
	4	-	6,12	-	-	-	-	-	-
	6	-	-	-	-	-	-	-	-
Верхова	1	-	4,2	6,96	10,17	-	-	-	-
	2	-	2,52	7,14	11,16	-	-	-	-
	4	-	4,26	-	-	-	-	-	-
	6	-	-	-	-	-	-	-	-
Суцільна	1	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	12,42	-	-	-	-	-	-	-
	4	15,36	-	-	-	-	-	-	-
	6	16,26	-	-	-	-	-	-	-

У насадженнях віком 5 років виникла суцільна (низова і верхова) пожежа. Зокрема, у віці 10-15 років пожежа розвивається з меншою швидкістю, що пояснюємо відсутністю сухих нижніх гілок, які сприяють поширенню пожежі кронами. За наявності обох форм пожежі (суцільна пожежа), висока швидкість поширення якої зумовлена значним запасом трави у сухому стані та становила понад 11 м/хв. У вегетаційний період вологість трави становила понад 100 % і поширення горіння не відбувалося. У віці 10-20 років за відсутності трави відбувалася одночасно низова і верхова пожежа, причому швидкість низової пожежі зменшувалась із збільшенням віку, а верхової – збільшувалась. Зростання з віком насаджень швидкості верхової пожежі зумовлена збільшенням запасу горючого матеріалу в кронах насадження, а відповідне зменшення швидкості низової пожежі – збільшенням відстані від нижніх гілок крон до підстилки, що зумовлює зменшення впливу полум'я верхової пожежі на наземний горючий матеріал – хвойну підстилку. У віці 20–40 років верхова пожежа не виникає, а швидкість поширення низової пожежі зростає з віком насадження, що пояснюється збільшенням запасу підстилки. Швидкість поширення лісової пожежі в соснових молодняках наведено на рис. 4.20.

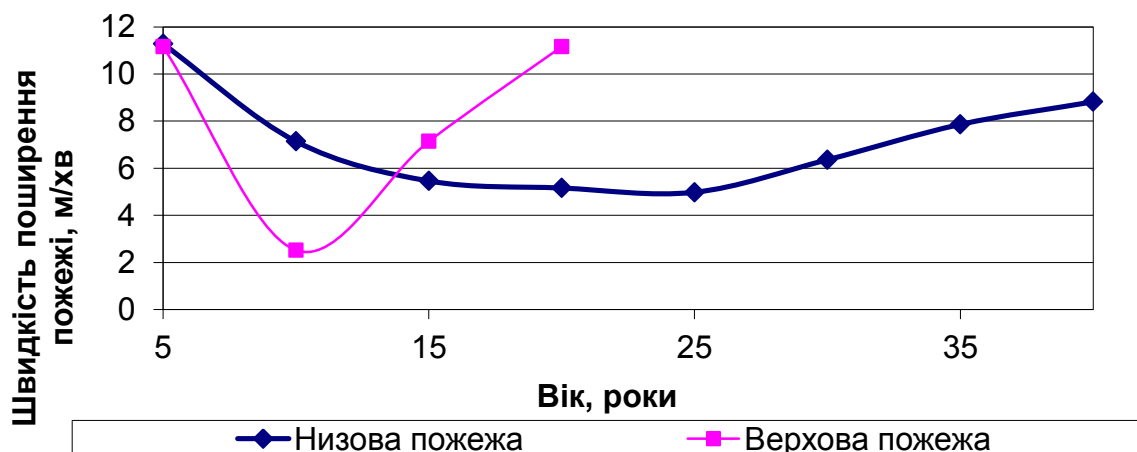


Рисунок 4.20 – Залежності швидкостей поширення лісових пожеж на дослідній ділянці залежно від віку соснових молодняків

Тому найбільш пожежонебезпечними є соснові молодняки віком до 20 років, особливо у віці 15–20 років, у яких низова пожежа переходить у верхову. У насадженнях віком понад 20 років небезпека менша, оскільки відбувається лише низова пожежа.

Перехід з низової у верхову пожежу пов'язаний з інтенсивністю тепловиділення (рис. 4.21).



Рисунок 4.21 – Інтенсивності виділення тепла на момент першої хвилини горіння соснових молодняків залежно від їх віку

Зауважимо, що на 60-ій секунді інтенсивність тепловиділення значно зростає для насаджень у віці 10–15 років, а у віці 20–40 років набуває менших значень. Це пояснює швидке займання крон і виникнення верхової пожежі в цей момент часу.

Отже, процеси виникнення низової та верхової пожеж у соснових насадженнях, а також їх поширення залежать від віку. Найбільшу небезпеку становлять насадження віком 5 років за умов сухого стану трав нижнього ярусу, а також насадження віком до 20 років, у яких виникають верхові пожежі. Для насаджень віком 25–40 років небезпека нижча через виникнення лише низових пожеж.

4.4. Висновки за розділом

4.1.1. В результаті математичного моделювання процесу нагрівання хвоїнки внаслідок контакту з нагрітим до високої температури тілом за отриманими залежностями температури від часу та відстані до місця контакту встановлено, що температура сухої хвої буде зростати швидше, ніж живої, прогріваючи її, наприклад, за 400 с на довжину $2,2 \cdot 10^{-3}$ м у порівнянні з живою – $6 \cdot 10^{-4}$ м. Це зумовить її швидше займання.

4.4.2. Встановлено, що проміжок часу до займання сухої хвої внаслідок теплового випромінювання від полум'я низової пожежі становить 6,7 хв, що в 4 рази менше, порівняно з живою, зумовлюючи значне зростання пожежонебезпеки за наявності сухої хвої в нижніх гілках крони.

4.4.3. Виявлено, що лінійна швидкість поширення пожежі в насадженнях сосни звичайної у молодому віці є найбільшою для насаджень у віці 5–20 років, у яких спостерігається виникнення і поширення верхової і низової пожежі (суцільної у віці 5 років) на відміну від насаджень віком понад 20 років, у яких виникає лише низова пожежа. Швидкість поширення пожежі зростає з віком та швидкістю вітру.

4.4.4. Результати досліджень опубліковано в [46], [47], [101], [102].

РОЗДІЛ 5

АПРОБУВАННЯ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

5.1. Результати досліджень займання хвойної та трав'яної підстилки соснових молодняків в лісовому господарстві

В соснових лісах опала хвоя є основним компонентом лісової підстилки, пожежна небезпека якої зумовлена не лише вологістю хвої, вмістом органічних речовин, але й структурою, геометричними і фізичними параметрами підстилки, властивостями ґрунтів, рельєфом, експозицією, розташуванням під наметом та ін. У зв'язку з цим для отримання інформації про поточний стан пожежної небезпеки підстилки дослідження найбільш доцільно проводити в природних умовах.

Найбільш інформативними даними про стан пожежної небезпеки є показники, отримані в процесі вогневих досліджень. Для забезпечення однакових умов проведення експерименту необхідна наявність джерел займання зі стабільними показниками. Оскільки джерела запалювання, які базуються на горінні горючих матеріалів, наприклад, гексаміну, суміші опилок і дизпалива, спеціальних сумішей [122, 125], що дають змогу отримати вищу температуру полум'я, нагрітих до високої температури одиничних горючих часток [33] або короткочасно нагрітих металевих конструктивних елементів [129], не дають можливість регулювання температури займання, пожежну небезпеку оцінювали за часом самозаймання шару підстилки з використанням запропонованого Пристрою для дослідження займистості горючого матеріалу з використанням електронагрівального елемента [78]. Джерелом запалювання є елемент цього пристрою – ніхромові спіраль, нагріта електричним струмом до необхідної температури, значення якої можна регулювати, задаючи величину, потрібну для самозаймання підстилки [130].

Дослідження займання підстилки соснових молодняків проводили в соснових насадженнях віком 15–20 років. Товщина підстилки відрізнялась

незначно і становила 1,5–2,5 см. Перед проведенням досліджень за діелектричними властивостями [52] визначали вологість хвої, відібраної з фрагменту підстилки, розташованої поруч з місцем займання. Значення вологості хвої – $12,95 \pm 2 \%$. Температура повітря – $+22 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Експеримент здійснювали на 5 вибраних випадковим чином ділянках підстилки. Електронагрівальний елемент розміщували на поверхні підстилки (рис. 5.1).



Рисунок 5.1 – Загальний вигляд процесу визначення температури та проміжку часу до займання у польових умовах з використанням розробленого пристрою

На кожній з 5 ділянок займання проводили тричі. Всього провели 15 дослідів. Отримані результати дослідження наведено в табл. 5.1.

Таблиця 5.1

Результати досліджень займання лісової підстилки

Номер ділянки	Дослід, № п/п	Займання	Час до займання, с	Ймовірність займання	Середній час до займання, с
1	2	3	4	5	6
1	1.1	—	—	1/3	37,18
	1.2	—	—		
	1.3	Відбулось	37,18		
2	2.1	—	—	1/3	23,23
	2.2	—	—		
	2.3	Відбулось	23,23		

Продовження табл. 5.1.

1	2	3	4	5	6
3	3.1	Відбулось	27,03	2/3	20,40
	3.2	Відбулось	13,77		
	3.3	–	–		
4	4.1	Відбулось	22,11	1/3	22,11
	4.2	–	–		
	4.3	–	–		
5	5.1	Відбулось	31,36	2/3	25,79
	5.2	Відбулось	20,22		
	5.3	–	–		

Результати дослідження показали, що підстилка займалась не завжди. У майже половини випадків відбувалося тління хвої, яке тривало більше ніж 60 с, після чого експеримент припиняли. У решті випадків виникало полуменеве горіння.

Отже, за результатами польових досліджень встановлено, що лісова підстилка в соснових молодняках є пожежонебезпечною і може зайнятися з ймовірністю, близькою до 1/2 від джерела з температурою 450°C в середньому за 25,7 с.

5.2. Економічне обґрунтування залучення сил і засобів для гасіння пожежі соснових молодняків

Вирощування соснових насаджень має важливе значення для економіки України. Основною продукцією лісової галузі є стовбурова деревина. Недотримання протипожежних заходів, особливо в пожежонебезпечний період, може зумовити виникнення верхових пожеж, знищення деревини та матеріальних втрат до яких належать:

- кошти, витрачені на процес лісорозведення та лісовідновлення;
- втрати готової продукції – деревини, яка в результаті пожежі стає непридатною до використання;
- вартість проведення санітарних чисток лісових територій після пожеж.

З метою запобігання виникненню пожеж, уникнення матеріальних втрат, пов'язаних з лісовідновленням після пожеж, а також мінімізації витрат на

пожежогасіння під час планування протипожежних заходів необхідно враховувати показники пожежної небезпеки соснових насаджень, які змінюються в процесі росту. До таких показників, зокрема, належать пожежне навантаження, основу якого становить маса стовбурової деревини на одиниці площі, яка залежить від віку та лісівничих параметрів насадження, а також швидкість поширення пожеж, яка залежить від віку і швидкості вітру. Тому для оцінювання можливих збитків та їх мінімізації потрібно визначити площу пожежі, яка пошириться на ділянці лісу, об'єм знищеної вогнем деревини та динаміку зміни цих показників. Відомо, що за наявності вітру та однорідних горючих властивостей лісового насадження, формою пройденної вогнем ділянки буде еліпс [118], розміри якого залежать від швидкостей фронту, тилу, флангів пожежі і часу (рис. 5.2).

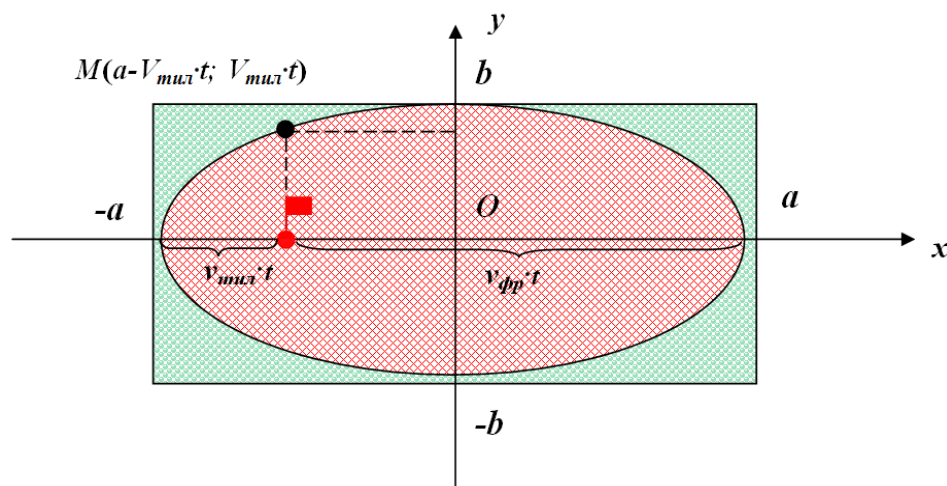


Рисунок 5.2— Еліпс, який описує межу лісової пожежі в момент часу t для швидкості фронту $V_{фр}$ і швидкості тилу $V_{тил}$

За результатами моделювання пожежі соснових молодняків у WFDS встановлено, що для насаджень у віці 25–40 років виникає переважно низова пожежа, яка є менш небезпечною, ніж верхова. Тому доцільним оцінювати та мінімізувати насамперед втрати об'єму деревини соснових молодняків внаслідок верхової пожежі для насаджень, вік яких становить 5–20 років в залежності від швидкості вітру. Ці втрати розраховували з використанням Методики оцінювання наслідків лісових пожеж [93], а також значень швидкостей поширення фронту верхової пожежі,

визначених за результатами моделювання у WFDS (табл. 4.9) для швидкостей вітру – 2, 4, та 6 м/с.

Площу еліпса визначали за формулою

$$S = \pi \cdot a \cdot b, \quad (5.1)$$

де a та b – півосі еліпса, м. У (5.1) одну із півосей еліпса a можна виразити як

$$a = \frac{1}{2}(v_{\text{фр}} + v_{\text{тил}}) \cdot t, \quad (5.2)$$

де $v_{\text{фр}}$ – швидкість поширення фронту пожежі, м/хв; $v_{\text{тил}}$ – швидкість поширення тилу пожежі, м/хв; t – час розвитку пожежі, хв. Для визначення другої півосі використовували канонічне рівняння еліпса

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1. \quad (5.3)$$

Оскільки у напрямках флангів швидкість пожежі вважають такою ж, як і в напрямку тилу, координати однієї з точок еліпса $M(a - v_{\text{тил}} \cdot t; v_{\text{тил}} \cdot t)$. Підставивши ці координати в канонічне рівняння еліпса, отримуємо залежність

$$\frac{(a - v_{\text{тил}} \cdot t)^2}{a^2} + \frac{v_{\text{тил}}^2 \cdot t^2}{b^2} = 1, \quad (5.4)$$

з якого виразимо другу з півосей еліпса b

$$b = \frac{v_{\text{тил}} \cdot t \cdot a}{\sqrt{2av_{\text{тил}} \cdot t - v_{\text{тил}}^2 \cdot t^2}}. \quad (5.5)$$

З урахуванням (5.2) і (5.5) з (5.1), отримуємо залежність, що описує площу, пройдену пожежею у м^2 за час t , хв:

$$S(t) = \frac{\pi}{4} \frac{(v_{\text{фр}} + v_{\text{тил}})^2 \cdot v_{\text{тил}}}{\sqrt{(v_{\text{фр}} \cdot v_{\text{тил}})}} \cdot t^2, \quad (5.6)$$

Похідна функції (5.6), яка дає змогу отримати інтенсивність зростання площі, пройденої пожежею від часу, має вигляд

$$S'(t) = \frac{\pi (v_{\phi p} + v_{\text{тил}})^2 \cdot v_{\text{тил}}}{2 \sqrt{(v_{\phi p} \cdot v_{\text{тил}})}} \cdot t \quad (5.7)$$

За формулою (5.7) отримуємо інтенсивності зростання площі, пройденої пожежею впродовж 40 хв у віці 5–20 років (рис. 5.3)

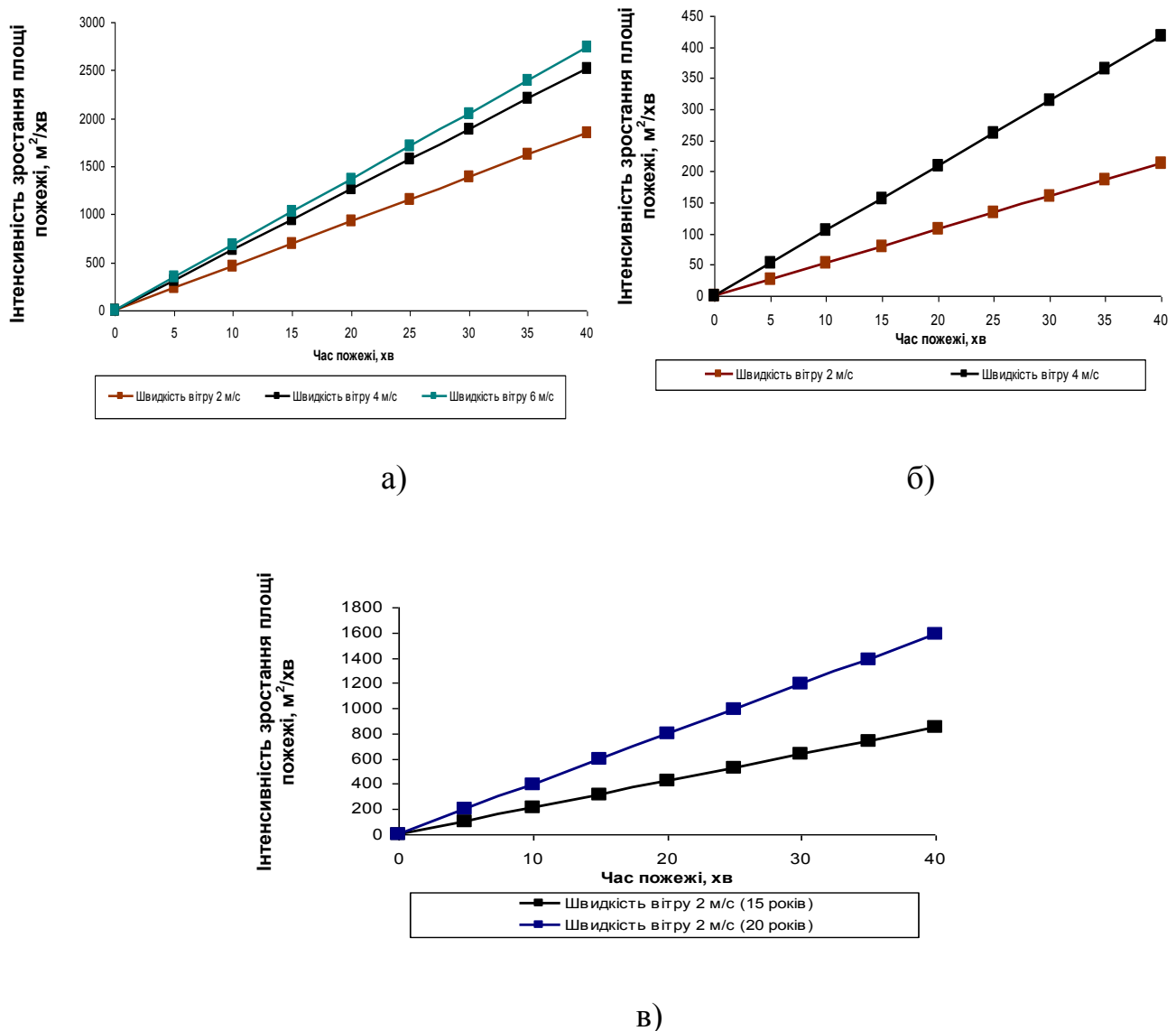


Рисунок 5.3 – Інтенсивність зростання верхової пожежі ділянкою насаджень впродовж 40 хв: а – у віці 5 років; б – у віці 10 років; в – у віці 15 та 20 років

Об'єм деревини, яка ушкоджується та стає непридатною для господарського використання внаслідок проходження верхової пожежі сосновими насадженнями, визначали за залежністю

$$V_{ушк}(t) = S(t) \cdot V_з \cdot K_{ушк} \cdot 10^{-4}, \quad (5.8)$$

де $V_з$ – запас стовбурів, $\text{м}^3/\text{га}$ [77], $K_{ушк}$ – коефіцієнт ушкодженої деревини [93]. Оскільки за методикою [93] кількість непридатної для реалізації деревини внаслідок пожежі для соснових насаджень становить 50%, для розрахунків коефіцієнт ушкодження приймали $K_{ушк}=0,5$. Динаміку зміни об'єму непридатної для реалізації деревини соснових насаджень, ушкодженої пожежею протягом 40 хв, в залежності від віку та швидкості вітру, зображено на рис. 5.4.

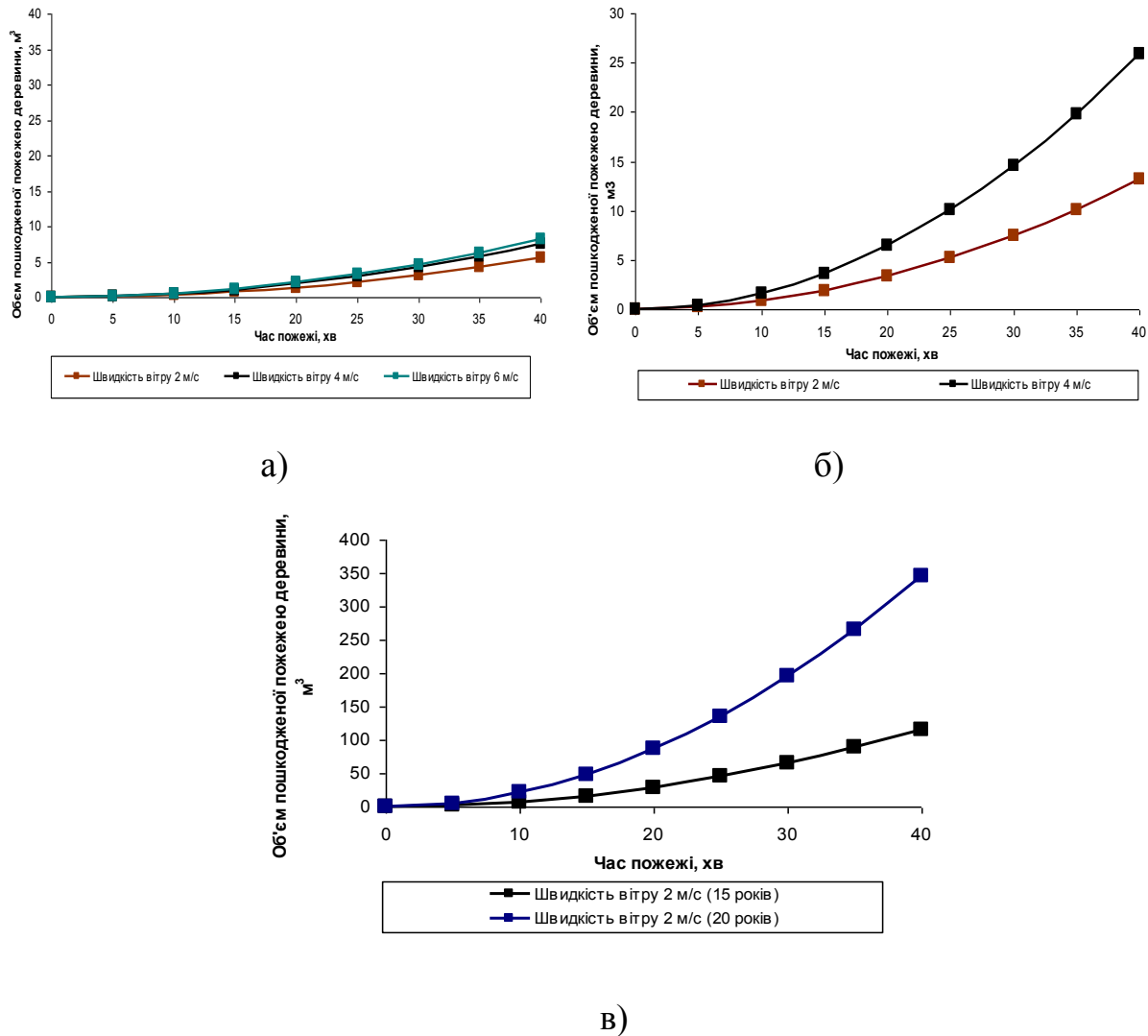


Рисунок 5.4 – Залежність об'єму непридатної для реалізації деревини від тривалості горіння впродовж 40 хв: а – у віці 5 років; б – у віці 10 років; в – у віці 15 та 20 років

З рис. 5.4 видно, що найбільшого ушкодження і матеріальних збитків зазнають насадження віком 20 років.

Для насаджень у віці 5 років за швидкості вітру 6 м/с через 40 хв після початку пожежі знищується близько 8,20 м³ деревини. Для 20-річних соснових насаджень за таких же умов об'єм пошкодженої деревини становить 346,36 м³.

Інтенсивність зростання об'єму непридатної для реалізації деревини внаслідок пожежі визначали за формулою

$$V'_{ушк}(t) = S'(t) \cdot V'_z \cdot K_{ушк} \cdot 10^{-4}. \quad (5.9)$$

За пожежі тривалістю 40 хв та відповідної швидкості вітру ця величина набуде значень, наведених в табл. 5.2.

Таблиця 5.2

Інтенсивність зростання об'єму непридатної для реалізації деревини внаслідок пожежі тривалістю 40 хв, м³/хв

Вік насаджень, роки	Швидкість вітру, м/с		
	2	4	6
5	5,56	7,55	8,20
10	13,23	25,91	—
15	115,77	—	—
20	346,36	—	—

Незважаючи на те, що інтенсивність зростання площі, пройденої вогнем, є найбільшою у віці 5 років, економічні збитки за об'ємом ушкодженої пожежею деревини будуть найбільшими для насаджень віком 20 років. Згідно з даними табл. 4.9, інтенсивність зростання об'єму непридатної для реалізації деревини зростає з віком та із зростанням швидкості вітру.

Отже, для мінімізації збитків від пожеж та подальших витрат на лісовідновлення у соснових молодняках в процесі реалізації протипожежних заходів, а також залучення сил і засобів для гасіння пожеж слід враховувати вік насаджень та наявність вітру.

5.3. Удосконалення «Шкали оцінки природної пожежної небезпеки земельних ділянок лісового фонду України»

З урахуванням результатів досліджень запропоновано удосконалення «Шкали оцінки природної пожежної небезпеки земельних ділянок лісового фонду України», регламентованої Правилами пожежної безпеки в лісах України, шляхом поділу I класу природної пожежної небезпеки на підкласи: Ia та Ib. (табл. 5.3).

Таблиця 5.3

Удосконалена шкала оцінки природної пожежної небезпеки земельних ділянок лісового фонду України, запропонована за результатами дисертаційних досліджень

Клас пожежної небезпеки	Підклас пожежної небезпеки	Об'єкт загоряння (характерні типи насаджень і умов місцезростання, категорії не вкритих лісовою рослинністю і нелісових земель)	Найбільш імовірні види пожеж, умови і тривалість періоду їх можливого виникнення і розповсюдження
1	2	3	4
I	Ia	Хвойні, зокрема соснові насадження віком 5–20 років в усіх типах умов місцезростання (ТУМ).	Протягом усього пожежонебезпечного періоду є підвищена загроза виникнення низових лісових пожеж з переходом у верхові.
	Ib	Хвойні, зокрема соснові насадження віком 25–40 років в усіх типах умов місцезростання (ТУМ). Насадження хвойних порід старші 40 років з індексами 0 (дуже сухі), 1 (сухі). Насадження сосни гірської, ялівцю, туї незалежно від віку та ТУМ. Незімкнуті лісові культури усіх порід. Зруби з-під хвойних порід, згарища, загиблі насадження (вітровали, буреломи та інші). Зруби з-під листяних порід, інші не вкриті лісовою рослинністю землі (крім лісових шляхів, просік, протипожежних розривів), які розташовані серед насаджень хвойних порід. Лісові насадження з рівнем радіаційного забруднення 15 кІ/кв.км і вище, незалежно від породного складу, віку і ТУМ	Протягом усього пожежонебезпечного періоду є загроза виникнення низових лісових пожеж без переходу у верхові.

Продовження табл. 5.3

1	2	3	4
II	Не класифікується	Насадження хвойних порід старші 40 років в ТУМ з індексом 2 (свіжі). Насадження листяних порід в ТУМ з індексами 0,1	Низові пожежі можливі протягом усього пожежонебезпечного періоду, верхові - в періоди пожежних максимумів
III	Не класифікується	Насадження хвойних порід старші 40 років в ТУМ з індексами 3 (вологі), 4 (сирі). Насадження листяних порід в ТУМ з індексом 2	Низові і верхові пожежі можливі в період літнього пожежного максимуму
IV	Не класифікується	Насадження хвойних порід старші 40 років в ТУМ з індексом 5 (мокрі). Насадження листяних порід в ТУМ з індексами 3, 4. Зруби з-під листяних порід (серед насаджень листяних порід), інші не вкриті лісовою рослинністю землі	Низові пожежі можливі тільки в періоди пожежних максимумів
V	Не класифікується	Листяні насадження в ТУМ з індексом 5. Не вкриті лісовою рослинністю землі (лісові шляхи, просіки, візири, протипожежні розриви). Нелісові землі (крім сіножатей, пасовищ, садів, ягідників)	Виникнення пожежі можливо тільки при довгострокових посухах

На відміну від шкали, зазначеної у [88] запропонована враховує особливості впливу чинників на пожежну небезпеку в соснових молодняках, зокрема те, що в пожежонебезпечний період у соснових насадженнях пожежна небезпека соснових молодняків віком до 20 років, особливо у віці від 5 до 20 років, суттєво відрізняється від пожежної небезпеки соснових насаджень старшого віку, за швидкості вітру 1–4 м/с пожежі соснових молодняків на відміну від пожеж насаджень віком понад 20 років переходять з низових у верхові, при цьому лінійна швидкість поширення пожежі зростає у 2–5 разів.

Запропонована шкала впроваджена в діяльність ДП «Рава-Руське лісове господарство», що засвідчується відповідним актом впровадження (Додаток Д). Практичне використання запропонованої шкали дає змогу здійснювати науково обґрунтований вибір критерію оцінювання пожежної небезпеки соснових лісових насаджень, як найбільш поширених серед хвойних, своєчасно та

об'єктивно прогнозувати пожежну небезпеку, а також планувати відповідні протипожежні заходи в таких місцях зростання лісових насаджень.

5.4. Висновки за розділом

5.4.1. За результатами польових досліджень встановлено, що лісова підстилка в соснових молодняках є пожежонебезпечною і може зайнятися з ймовірністю, близькою до 1/2 від джерела з температурою 450°C за 25,7 с.

5.4.2. Встановлено, що інтенсивність зростання площі, пройденої вогнем у соснових молодняках, є найбільшою у віці 5 років, проте економічні збитки за об'ємом ушкодженої пожежею деревини будуть найбільшими для насаджень віком 20 років.

5.4.3. Запропоновано шкалу оцінки природної пожежної небезпеки земельних ділянок лісового фонду, відповідно до якої I клас пожежної небезпеки ділиться на 2 підкласи: Ia – для соснових насаджень віком 5-20 років, де протягом усього пожежонебезпечного періоду є підвищена загроза виникнення низових лісових пожеж з переходом у верхові, та Ib – де протягом усього пожежонебезпечного періоду є загроза виникнення низових лісових пожеж без переходу у верхові.

Результати досліджень опубліковано в [50], [78].

ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеною науковою роботою, в якій наведено розв'язання актуального наукового завдання розкриття особливостей впливу чинників на пожежну небезпеку соснових молодняків земельних ділянок лісового фонду України як підґрунтя підвищення ефективності забезпечення їх пожежної безпеки.

Основні наукові та практичні результати роботи наведено нижче.

1. За результатами аналізу світового та вітчизняного досвіду з питань пожежної небезпеки лісів виявлено зокрема, що у 2014 році тільки в Росії відбулось 16865, Польщі – 4685, а в Україні – понад 2 тис лісових пожеж, які призвели до значних матеріальних та екологічних збитків. Зокрема знищується лісовий фонд, виникають збитки для флори і фауни, а також біосфери. Також небезпечним фактором лісових пожеж є викиди парникових газів, тільки впродовж 2014 року їх обсяг в Україні досяг таких значень: вуглекислого газу 342,02; чадного газу 23,32; метану 1,02 оксидів азоту 0,65, тис. тонн відповідно. Наймасштабніші лісові пожежі класифікуються як надзвичайні ситуації природного характеру.

2. На підставі результатів аналізу сучасного стану забезпечення пожежної безпеки земельних ділянок соснових насаджень лісового фонду України встановлено, що пожежна небезпека ділянок молодих соснових насаджень є вищою порівняно з насадженнями старшого віку, у той час як шкалою оцінки природної пожежної небезпеки земельних ділянок лісового фонду не передбачено урахування цього факту. Це може призводити до помилкових управлінських рішень в системі забезпечення пожежної безпеки відповідних об'єктів лісового фонду України.

3. Висунуто ідею, що підвищення ефективності системи забезпечення пожежної безпеки молодих соснових насаджень може бути досягнуто шляхом удосконалення методології оцінювання їх природної пожежної небезпеки, яка враховує особливості впливу чинників на її стан.

4. Обґрунтовано застосування методу дієлькометрії для визначення вологості голок хвої як чинника впливу на показники їх пожежної небезпеки та встановлено, що значення вологості (W , %) описується функцією $W = -0,0461C^3 + 3,7016C^2 - 87,781C + 658,57$, де C – ємність дієлькометра, пФ.

5. За результатами експериментальних досліджень виявлено, що швидкість вигорання зразків хвої змінюється в сторону збільшення в ряду свіжозірвана – опала – висушена і на 60-й с вигорання відрізняється в 1,3 рази для висушеної хвої порівняно зі значенням для свіжозірваної, і корелює із зміненням їх вологості.

6. Розроблено, виготовлено, апробовано та впроваджено захищений патентом України на корисну модель пристрій для дослідження займистості твердих горючих речовин та матеріалів з використанням електронагрівального елемента, який відрізняється тим, що при його використанні можна досліджувати займистість матеріалів в широкому діапазоні температур; наявність автономного джерела живлення дає змогу застосовувати пристрій на об'єктах з відсутнім електроживленням. Із застосуванням цього пристрою в польових умовах визначено, що лісова підстилка соснових молодняків займається внаслідок контакту протягом не більше 30 с з нагрітим до температури 450°C електронагрівальним елементом розробленого пристрою.

7. Експериментальними дослідженнями виявлено, що температура займання (t , $^{\circ}\text{C}$) хвої соснових молодняків залежить від її вологості і описується залежністю $t = -0,002W^2 + 0,8466W + 204,49$.

8. За результатами комп'ютерного моделювання:

- розраховано лінійну швидкість розповсюдження пожежі в соснових молодняках, яка практично співпадає зі значенням, визначеним за результатами експерименту в польових умовах (1,87 м/хв та 1,85 м/хв відповідно);

- встановлено, що в соснових насадженнях пожежна безпека соснових молодняків віком до 20 років (особливо у віці від 5 до 20 років) суттєво відрізняється від пожежної небезпеки насаджень старшого віку, зокрема пожежі соснових молодняків на відміну від пожеж насаджень віком понад 20

років переходять з низових у верхові, при цьому лінійна швидкість поширення зростає у 3–5 разів.

9. За результатами математичного моделювання встановлено, що наслідком контакту сухої хвої з тілом, нагрітим до температури понад 743 К, є виникнення полуменевого горіння на відміну від контакту свіжозірваної хвої з нагрітим тілом до температури 823 К, за якого виникає тільки тління. Встановлено, що внаслідок радіаційного випромінювання полум'я низової пожежі, проміжок часу до займання сухої хвої на нижніх гілках крон не буде перевищувати 404 с, що в 4 рази менше порівняно зі свіжозірваною хвоєю.

10. Запропоновано внесення змін до «Шкали оцінки природної пожежної небезпеки земельних ділянок лісового фонду», регламентованої Правилами пожежної безпеки в лісах України, шляхом поділу I класу небезпеки на два підкласи: Ia – для соснових молодняків віком до 20 років, Ib – для соснових молодняків від 20 до 40 років.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Абдурагимов И. М., Андросов А. С., Исаева Л. К., Крылов Е. В. Процессы горения. *Высшая инженерная пожарно-техническая школа МВД СССР*. Москва, 1984. 268 с.
2. Антонов А. В. Узагальнення і розвиток наукових основ розроблення та технологій застосування екологічно прийнятних вогнегасних речовин: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук. Київ, 2017. 56 с.
3. Арцыбашев Е. С. Лесные пожары и борьба с ними. *Лесная промышленность*. Москва, 1974. 150 с.
4. Асеева Р. М., Серков Б. Б., Сивенков А. Б. Горение и пожарная опасность древесины. *Пожаровзрывобезопасность*. 2012. Т. 21, № 1. С. 19—32.
5. Баратов А. Н., Корольченко А. Я., Кравчук Г. Н. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения: справ. изд. : в 2 книгах. *Химия*. Москва. 1990. 496 с.
6. Баровик Д. В., Корзюк В. И., Таранчук В. Б. К обоснованию математических моделей низовых лесных пожаров. *Труды института математики*: науч. журнал, 2013. Том 21. №1. С. 3—14.
7. Білей П. В., Павлюст В. М. Сушіння і захист деревини. *Ліга-Прес*. Львів. 2008. 312 с.
8. Вакуров А. Д. Лесные пожары на севере. *Наука*. Москва. 1975. 100 с.
9. Величко Л. Д., Лозинський Р. Я., Семерак М. М. Термодинаміка і теплопередача в пожежній справі. *Сполом*. Львів. 2011. 504 с.
10. Генсірук С. А. Ліси України. *Наукова думка*. Київ. 1992. 408 с.
11. Гербут Ф. Ф. Лісова пірологія. *УНУГФ*. Ужгород. 2012. 103 с.
12. Гиниятов А. А., Кугуракова В. В., Якушев Р. С. Разработка симуляционного приложения для моделирования лесных пожаров с учётом погодных условий и формы ландшафта. *Электронные библиотеки*. Т.19. №3. 2016. С.180—192.

13. Головне управління ДСНС України в Полтавській області: Полтава, 2016. URL: <http://poltava.dsns.gov.ua/> (дата звернення 20.11.2016).
14. Головне управління ДСНС України в Хмельницькій області Хмельницький, 2016. URL: <http://km.dsns.gov.ua/> (дата звернення 20.09.2016).
15. Головне управління статистики у Львівській обл. Львів, 2016. URL: <http://www.lv.ukrstat.gov.ua>. (дата звернення 17.06.2014).
16. Гриб В. М. Вплив господарських заходів на особливості таксаційної будови штучних соснових насаджень. *Вісник Дніпропетровського державного аграрного університету*. Дніпропетровськ, 2012. № 1. С. 182—185.
17. Гришин А. М. Математические модели лесных пожаров. *Изд-во Том. у-та*. Томск. 1981. 280 с.
18. Гришин А. М. О математическом моделировании природных пожаров и катастроф. *Вестник томского государственного университета*, Томск. 2008. № 2(3). С. 105—114.
19. Гуліда Е. М., Карабин О. О., Смотри О. О. Математична модель поширення лісових пожеж. *Пожежна безпека : зб. наук. праць*. Львів, 2005. № 6. С. 7—12.
20. Гуменюк В.В., Зібцев С. В., Борсук А. А. Вплив низової пожежі на деревостан та наземні лісові горючі матеріали в соснових лісах центрального полісся України. *Лісове і садово-паркове господарство : електронний фаховий науковий журнал*. 2015. № 6. 9 с.
21. Демидов П. Г., Шандыба В. А., Щеглов П.П. Горение и свойства горючих веществ. *Химия*. Москва. 1981. 272 с.
22. Державна служба України з надзвичайних ситуацій. URL: <http://www.dsns.gov.ua/> (дата звернення 16.06.2014).
23. Державна служба статистики України. Київ, 2016. URL: <http://www.lv.ukrstat.gov.ua> (дата звернення 16.06.2014).
24. Державне агентство лісових ресурсів України. Київ, 2016. URL : <http://dklg.kmu.gov.ua> (дата звернення 03.09.2016).

25. Доррер Г. А. Динамика лесных пожаров. *Изд-во СО РАН*. Новосибирск. 2008. 404 с.
26. Доррер Г. А., Шаталов П. С. Использование кластерных вычислительных систем и данных космического мониторинга для моделирования лесных пожаров. *Вестник Московского университета им. С. Ю. Витте*. Москва, 2008. С. 289–295.
27. Доррер Г. А., Иванилова Т. Н. Компьютерные обучающие средства для подготовки специалистов по охране леса, № 1 – 2. 2008. С. 128—134.
28. Дослідження пожеж. Довідково–методичний посібник. *Пожінформтехніка*. Київ. 1999. 224 с.
29. Драйздейл Д. Введение в динамику пожаров. *Стройиздат*. Москва. 1990. 424 с.
30. ДСТУ 2272:2006. Пожежна безпека. Терміни та визначення основних понять. Київ, 2007. 28 с.
31. Ефименко В. М. Лесная пирология : практическое пособие для студентов специальности 1-75 01 01 «Лесное хозяйство». *И-во ГГУ им. Ф. Скорины*. Гомель. 2009. 90 с.
32. Зандерманн В. Природные смолы, скипидары, таловое масло (химия и технология. Лесная промышленность. Москва. 1964. 576 с.
33. Захаревич А. В., Барановський Н. В., Максимов В. И. Зажигание лесных горючих метериалов одиночными, нагретыми до высоких температур частицами. *Пожаровзрывобезопасность*. Москва, 2012. Т. 21, № 4. С. 13—16.
34. Зигель Р. Теплообмен излучением. *Мир*. Москва, 1975. 935 с.
35. Иванников В. П., Ключ П.П. Справочник руководителя тушения пожара *Стройиздат*. Москва. 1987. 288 с.
36. Иванов М. А. Химия древесины и целлюлозы. Москва. *Лесная промышленность*. 1982. 400 с.
37. Исаева Л. К. Пожары и окружающая среда. Москва, *Изд.Дом «Калан»*. 2001. 222 с.

38. Кичилюк О. В. Кайдик О. Ю. Початкова густота культур сосни звичайної в умовах Волинського Полісся. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України*. Київ, 2010. Вип. 152, ч. 2. С. 222—226.
39. Ковалевський С. Б. Роль трав'яних рослин у культурах сосни звичайної Наукові доповіді НАУ. *Електронний журнал*. 2005. №1. С. 78—83.
40. Ковалевський С. Б. Динаміка появи та розростання трав'яних рослин у соснових культурах свіжих суборів східного полісся України. *Науковий вісник ДЛУ України: зб. наук.-техн. праць*. Львів, 2004. Вип. 14.5. С. 78—83.
41. Кодекс цивільного захисту України. Затв. Верховною Радою України 02.10.2012. Чинний від 01.07.2013
42. Конев Э. В. Физические основы горения лесных горючих материалов. *Наука*. Новосибирск. 1977. 239 с.
43. Корольченко А. Я., Корольченко Д. А. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения. Справочник: в 2-х ч. 2-е изд., перераб. и доп. Ч. 1. *Асс. "Пожнаука"*. Москва. 2004. 713 с.
44. Корольченко А. Я., Корольченко Д. А. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения. Справочник: в 2-х ч. 2-е изд., перераб. и доп. Ч. 2. *Асс. "Пожнаука"*. Москва. 2004. 774 с.
45. Кузик А. Д., Товарянський В. І. Масова швидкість вигорання хвої сосни звичайної як показник пожежної небезпеки. *Пожежна безпека: Збірник наукових праць*. ЛДУ БЖД. Львів, 2014. № 25. С. 57—61.
46. Кузик А. Д., Товарянський В. І. Математичне моделювання процесів кондуктивного і радіаційного теплообміну під час пожежі в соснових лісах. *Пожежна безпека: Збірник наукових праць*. ЛДУ БЖД. Львів, 2017. № 30. С. 105—113.
47. Кузик А. Д., Товарянський В. І. Моделювання пожежі соснових молодняків. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: Матеріали VII Міжнар. наук.-практ. конф. (Черкаси, 19–20 травня)*. ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. Черкаси, 2016. С. 219—220.

48. Кузик А. Д. Моделювання процесів займання лісової підстилки. *Пожежна безпека: Збірник наукових праць. ЛДУ БЖД. Львів, 2007. № 10. С. 170—174.*
49. Кузик А. Д. Пожежонебезпечні властивості лісових горючих матеріалів. *Науковий вісник НЛТУ України: зб. наук.-техн. праць. Львів, 2014. Вип. 24.4. С. 214—218.*
50. Кузик А. Д., Товарянський В.І. Пожежонебезпечні властивості хвойної підстилки соснових молодняків *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: Матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. Черкаси, 2017. С. 206—207.*
51. Кузик А. Д., Товарянський В. І. Про пожежну небезпеку молодих соснових насаджень. *Пожежна безпека: Збірник наукових праць. ЛДУ БЖД. Львів, 2014. № 24. С. 68—73.*
52. Кузык А. Д., Товарянський В. И. Оценка влажности хвои сосны обыкновенной как фактора пожарной опасности по измерению ее диэлектрической проницаемости. *Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza. Józefów, 2015. Vol. 39, Issue 3. Pp. 111—117.*
53. Кузык А. Д., Товарянський В. И. Пожароопасные свойства хвои сосны обыкновенной в возрасте молодняка. *Чрезвычайные ситуации: теория, практика, инновации ЧС: Матер.науч-техн.конф. (Гомель, март 2016). Гомель, 2016. С. 94—95.*
54. Курбатский Н. П. Вопросы лесной пирологии. Обнаружение и анализ лесных пожаров. *ИЛД СО АН СССР. Красноярск.1972. С. 171—231.*
55. Курбатский Н. П. Пожарная опасность в лесу и ее измерение по местным шкалам. Лесные пожары и борьба с ними. *Академия наук СССР. Москва. 1963. 164 с.*
56. Кухлинг Х. Справочник по физике. *Мир. Москва.1980. 520 с.*
57. Лакида П. І. Фітомаса лісів України. *Збруч. Тернопіль. 2002. 256 с.*

58. Лыков А. В. Теория теплопроводности. Учебное пособие. *Высшая школа*. Москва. 1967. 600 с.
59. Мелехов И. С. Влияние пожаров на лес. *Государственное лесотехническое издательство*. Москва. 1948. 126 с.
60. Мелехов И. С., Душа-Гудым С. И., Сергеева Е. П. Лесная пирология: учебное пособие. *Изд-во Московского лесотехнического института*. Москва. 1982. Вып. 4. 67 с.
61. Мелехов И. С. Лесная пирология : учебное пособие. *Изд-во Московского лесотехнического института*. Москва. 1983. 59 с.
62. Мелехов И. С. Лесные пожары и борьба с ними. *Северное краевое изд-во*. Архангельск. 1935. 80 с.
63. Мелехов И. С. О теоретических основах лесной пирологии. *Изд-во Архангельского лесотехнического института*. Архангельск. 1944. 19 с.
64. Мелехов И. С. Природа леса и лесные пожары. *ОГИЗ*. Архангельск. 1947. 58 с.
65. Мельник О. М. Конверсійні коефіцієнти компонент фітомаси деревостанів національного природного парку "Прип'ять-стохід". *Науковий вісник НЛТУ України*: зб. наук.-техн. праць. Львів, 2015. Вип. 25.6. С. 78—85.
66. Методи дослідження пожеж. Методичний посібник. *УкрНДІПБ*. Київ. 2009. 240 с.
67. Монахов В. Т. Методы исследования пожарной опасности веществ. *Химия*. Москва. 1972. 416 с.
68. На Буковині горів молодий хвойний ліс. URL: http://zaxid.net/news/showNews.do?na_bukovini_goriv_molodiy_hvoyniy_lis&objectId=1076674 (дата звернення 04.08.2016).
69. На Вінничині горів сосновий ліс. URL: <http://www.vinnitsa.info/news/na-vinnichchini-goriv-sosnoviy-lis.html> (дата звернення 04.08.2016).
70. На Луганщині внаслідок обстрілу бойовиків горіли 15 га соснового лісу. URL:

http://zik.ua/news/2015/07/06/na_luganshchyni_vnaslidok_obstrilu_boyovykiv_goril_y_15_ga_sosnovogo_lisu_605101 (дата звернення 04.08.2016).

71. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Выпуск 3. Часть I. Метеорологические наблюдения на станциях. Государственный комитет СССР по гидрометеорологии и контролю природной среды. Л.: *Гидрометеоиздат*. 1985.

72. Національна доповідь про стан техногенної та природної безпеки в Україні у 2012 році. Київ, 2013. URL: <http://www.mns.gov.ua/content/nasdopovid2012.html> (дата звернення 20.02.2013).

73. Національна доповідь про стан техногенної та природної безпеки в Україні у 2014 році. Київ, 2015. URL: <http://www.dsns.gov.ua/files/prognoz/report/2014/ND2014.pdf> (дата звернення 03.04.2015).

74. Нестеров В. Г. Горимость леса и методы ее определения. *Гослесбумиздат*. Москва. 1949. 76 с.

75. Никитин В. М., Оболенская А. В., Щеголев В. П. Химия древесины и целлюлозы. *Лесная промышленность*. Москва. 1978. 368 с.

76. Никольский Б. П. Справочник химика: 2-е изд., перераб. и доп. *Химия*. Москва. 1963. Т. 1. 1002 с.

77. Нормативно-справочные материалы для таксации лесов Украины и Молдавии. *Урожай*. Киев. 1987. 559 с.

78. Патент КМ 106652 Україна. Пристрій для дослідження займистості горючого матеріалу з використанням електронагрівального елемента. Опубл. 25.04.2016.

79. Перелыгин Л. М. Древесиноведение. *Гослесбумиздат*. Москва. 1949. 375 с.

80. Перминов В. А. Математическое моделирование возникновения верховых и массовых лесных пожаров. Автореф. дис. на соискание ученой степени д.ф.-м. н. Томск, 2010. 39 с.

81. Писаренко А. И. Лесовосстановление. *Лесная промышленность*. Москва. 1977. 250 с.
82. Погода в Україні. Прогноз погоди від Sinoptik.UA. URL: <https://ua.sinoptik.ua/>. (дата звернення 04.08.2016).
83. Пожежі у природних екосистемах. Київ, 2012. URL: http://undicz.dsns.gov.ua/files/2013/12/29/1.3_2012.pdf (дата звернення 14.05.2013).
84. Полосинов С. А. Моделирование распространения лесного пожара и его локализации с применением авиационных средств. *Технологии техносферной безопасности*. 2013. №4 (50). С. 26.
85. Попович В. В. Еколого-техногенна небезпека сміттєзвалищ та наукові основи фітомеліоративних заходів їх виведення з експлуатації : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук. Київ, 2017. 42 с.
86. Правдин Л. Ф. Сосна обыкновенная. Изменчивость, внутривидовая систематика и селекция. *Наука*. Москва. 1964. 194 с.
87. Про затвердження Порядку класифікації надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру за їх рівнями. Постанова КМУ від 24.03.2004 № 368. Київ: 2004.
88. Про затвердження Правил пожежної безпеки в лісах України. Наказ Держлісгоспу від 27.12.2004 № 278. Київ. *Офіційний вісник України*. 2005. С. 321.
89. Свириденко В. Є., Бабіч О. Г., Швиденко А. Й. Лісова пірологія: підручник. *Агропромвидав України*. Київ. 1999. 172 с.
90. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования : ГОСТ 12.1.004-91. Постановление Госстандарта СССР от 14 июня 1991 г. N 87. М.: Стройиздат, 1991. 126 с.
91. Соболев В. Р., Гоман П. Н., Дедюля И. В., Бровка А. Г., Мазуренко О. Н. Тепловые свойства напочвенного материала леса при характерном содержании влаги. *Инженерно-физический журнал*. Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова Республики Беларусь. Минск, 2011. Т.84, № 5. С. 1079—1087.

92. Софронов М. А., Вакуров А. Д. Огонь в лесу. *Наука*. Новосибирск. 1981. 124 с.
93. Сборник методик по прогнозированию возможных аварий, катастроф, стихийных бедствий в РСЧС (Книга 2). *ВПНИ ГОЧС*. Москва, 1994
94. Статистичний щорічник України за 2014 рік. *Державна служба статистики України*. Київ. 2015. 586 с.
95. Тарасенко О. А. Вплив просторових флуктуацій пірологічних параметрів середовища на інтегральні характеристики низової лісової пожежі та умови її гасіння : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук. Харків, 2004. 21 с.
96. Ткач В. П. Ліси та лісистість в Україні: сучасний стан і перспективи розвитку. *Український географічний журнал*. 2012. № 2. С. 49—55.
97. Товарянський В. І., Кузик А. Д., Петровський В. Л. Взаємозв'язок між температурою та часом до займання хвої молодих соснових насаджень. *Пожежна безпека: Збірник наукових праць*. ЛДУ БЖД. Львів, 2015. № 26. С. 167—171.
98. Товарянський В. І., Кузик А. Д., Драч К. Л. Дослідження пожежної небезпеки підстилки соснових молодняків за умовами погоди. *Сучасний стан цивільного захисту України та перспективи розвитку: матеріали 19 Всеукраїнської науково-практичної конференції «Технології захисту/ПожТех – 2017»* (Київ, 10–11 жовтня). Київ, 2017. С. 428—207.
99. Товарянський В. І., Кузик А. Д. Дослідження пожежі молодих соснових насаджень. *Пожежна безпека: Збірник наукових праць*. ЛДУ БЖД. Львів, 2016. № 28. С. 113—120.
100. Товарянський В. І. Залежність вологості хвої сосни звичайної від її діелектричної проникності як фактор пожежної небезпеки. *Всеукраїнська науково-практичної конференції рятувальників: Матеріали наук.-практ. конф.* (Київ, 23–24 вер. 2014). Київ, 2014. С. 294—296.
101. Товарянський В. І., Кузик А. Д. Моделювання пожежі соснових насаджень у молодому віці. *Пожежна та техногенна безпека. Теорія,*

практика, інновації. Матеріали міжнародної наук.-практ. конф. (Львів, жов. 2016). Львів, 2016. С. 219—220.

102. Товарянський В. І., Кузик А. Д. Оцінювання залежності пожежної небезпеки соснових молодняків від віку. *Науковий вісник НЛТУ України : зб. наук.-техн. праць*. Львів, 2016. Вип. 26.5. С. 220—226.

103. Товарянський В. І., Кузик А. Д. Пожежна небезпека молодих соснових насаджень та шляхи її вирішення. *Проблеми екологічної безпеки: Зб. тез доповідей XIV Міжнародної наук.-практ. конф.* (Кременчук, 12–14 жов. 2016) Кременчук, 2016. С. 115.

104. Україна в цифрах 2015: статистичний збірник. *Державна служба статистики України*. Київ, 2016. 239 с.

105. Ходаков В. Е., Жарикова М. В. Лесные пожары: методы исследования. *Гринь Д.С.* Херсон, 2011. 470 с.

106. Храмов В. В., Судаков О. О., Кононов М. В., Устименко В. М., Будник М. М. Моделювання лісових пожеж на grid-кластерах. *Комп'ютерні засоби, мережі та системи*. 2012. № 11. С. 47—57.

107. Чекушкина Н. В., Невзорова Т. В., Ефремов А. А. Фракционный состав эфирного масла сосны обыкновенной. *Химия растительного сырья*. 2008. №2. С. 87–90.

108. Швиденко А. Й. Лісівництво. *Рута*. Чернівці, 2004. 304 с.

109. Ширяев Н. А. Актуальные проблемы обеспечения пожарной безопасности в лесах. Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. Воронежский институт ГПС МЧС России. Воронеж, 2016. Т.1.№7. С.297—301.

110. Шлапак В. В., Шлапак В. П. Взаємовплив трав'яної рослинності та сосни звичайної в умовах чигиринського бору. *Науковий вісник НЛТУ України : зб. наук.-техн. праць*. Львів, 2008. Вип. 18.1. С. 34—38.

111. Яворский Б. М., Детлаф А. А. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов. *Наука*. Москва, 1968. 939 с.

112. Anderson D. H., Catchpole E. A., De Mestre N. J., Parkes T. Modelling the spread of grass fires. *The Journal of the Australian Mathematical Society. Series B. Applied Mathematics*. 1982. Vol. 23, Iss.04. Pp. 451—466.
113. Afzal A., Mousavi S. F., Khademi M. Estimation of leaf moisture content by measuring the capacitance. *Journal of Agricultural Science Technology*. 2010. Vol. 12. Pp. 339—346.
114. Annual Fire Reports. Forest fires in Europe, Middle East and North Africa. URL: <http://forest.jrc.ec.europa.eu/effis/reports/annual-fire-reports/> (Last accessed 20.09.2016).
115. Apšegaitė V., Būda V. Polymorphism of Lithuanian Scots pine (*Pinus sylvestris*) with regard to monoterpene composition in needles. *Ekologija*. 2008. Vol. 54. No.1. Pp. 17—21.
116. Australian bushfire season 2014-15. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/2014%E2%80%9315_Australian_bushfire_season (Last accessed 20.09.2016).
117. Australia's State of the Forests Report. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/2014%E2%80%9315_Australian_bushfire_season (Last accessed 20.09.2016).
118. Catchpole E. A. Elliptical-fire perimeter and area-intensity distribution / E. A. Catchpole, M. E. Alexander and A. M. Gill. *Canadian Journal of Forest Research*. 1999. n.22. Pp. 968—972.
119. Czerpak T., Maciak T. Modelowania pożaru lasu. Część I. Metody i algorytmy modelowania pożaru lasu. *Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza*. 2011. Nr 3. Pp. 83—94.
120. Czerpak T., Maciak T. Modelowania pożaru lasu. Część IV. Modele inicjacji i rozprzestrzeniania się ognia koron drzew. *Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza*. 2012. Nr 2. Pp. 27—36.
121. Dupuy J. L., Marechal J., Morvan D. Fires from a cylindrical forest fuel burner: combustion dynamics and flame properties. *Combustion and Flame*. 2003. Vol. 135. P. 65—76.

122. Flammability and Carpet Safety: Technical Bulletin N. 1. 2015. Pp. 1—4
123. Flint A., Flint L. Particle density: methods of soil analysis. *Physical Methods. SSSA Book Series*. 2002. No. 5. Pp. 229—240.
124. Forest models. URL: <http://www.forestmodels.com>. (Last accessed 19.04.2016).
125. High temperature solid fire starter. United States Patent, Barthel, Nov. 29, 1983. URL: <https://www.google.com/patents/US4417900> (Last accessed 02.03.2016).
126. Hynynen J. Predicting tree crown ratio for unthinned and thinned Scots pine stands. *Canadian Journal of Forest Research*. 1995. Vol. 25(1). Pp. 57—62.
127. Isidorov V., Smolewska M., Purzynska-Pugacewicz A., Tyszkiewicz Z. Chemical composition of volatile and extractive compounds of pine and spruce leaf litter in the initial stages of decomposition. *Biogeosciences Discussion*. 2010. Vol. 7. Pp. 2785—2794.
128. Lakida P., Nilsson S., Shvidenko A. Estimation of Forest Phytomass for Selected Countries of the Former European USSR. WP-95-79. IIASA. Laxenburg, 1995. 33 p.
129. Liodakis S., Bakirtzisa D., Dimitrakopoulosb A. Ignition characteristics of forest species in relation to thermal analysis data. *Termochim acta*. 2002. Vol. 390. Pp. 83—91.
130. LM138/LM338 5-Amp Adjustable Regulators. URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm338.pdf> (Last accessed 03.03.2016).
131. Mell W., McNamara D., Maranghides A., McDermott R., Forney G., Hoffman C, Ginder M. Computer modelling of wildland-urban interface fires. *Fire & Materials*. San Francisco, 2011. 12 Pp.
132. Mell W. User Guide to WFDS. Wildland-urban interface Fire Dynamics Simulator. San Francisco, 2010. 28 Pp.
133. National Fire Protection Association. URL: <http://www.nfpa.org/news-and-research/fire-statistics-and-reports/fire-statistics/> (Last accessed 13.05.2014).

134. Rothermel R. C. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. *USDA Forest Service Research Paper. INT-115*. 1972. 40 p.
135. Shen D., Fang M. A review on ignition of cellulose materials under external heat flux. *International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes*. 2006. Vol. 8 .Pp. 28—42.
136. Stevens W. R. Stickel on the measurement and interpretation of forest-fire weather in the Western Adirondacks. *Monthly Weather Review*. 1932. P. 25.
137. Szczygieł R., Ubysz B. Wpływ zmian klimatycznych na kształtowanie się zagrożenia pożarowego lasów w Polsce. *Leśne Prace Badawcze*. 2008. 30 s.
138. Szczygieł R. Wielkoobszarowe pożary lasów w Polsce. *Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza*. 2012. Vol. 32. Issue 1. 120 s.
139. Szydlowski H. Pomiary fizyczne. Podrecznik dla nauczycieli. Państwowe wydawnictwo naukowe. Warszawa. 1977. 419 s.
140. Sytuacja pożarowa w Polsce. URL : <http://www.ibles.pl> (Last accessed 20.02.2014).
141. Rodríguez M., Manuel J., Fernández, Catherine, C. González, Blanca, Baldy , Virginie, Sánchez S., Antonio I., Ormeño, Elena, García V., Ángel The relationship between terpenes and flammability of leaf litter. *Forest Ecology and Management*. 2009. Vol. 257. Pp. 471—482.
142. Wagner V. Development and Structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System. Ottawa, 1987. 37 Pp.
143. Wagner Van C. E. Condition for the start and spread of crown fire. *Canadian J. For. Res.* 1977. Vol. 7. P. 23—34.
144. Wildland fires: a historical perspective. *U.S. Fire Administration topical fire research series*. URL: www.usfa.dhs.gov/downloads/pdf/tfrs/v1i3-508.pdf. (Last accessed 24.04.2016).
145. Wildland-Urban Fire Models. URL: <http://www.fs.fed.us/pnw/fera/wfds/index.shtml> (Last accessed 24.04.2016).
146. Wróblewska H., Splawa-Neyman S. Wlasciwosci chemiczne drewna sosny zwyczajnej. *Folia Forestalia Polonica. Series B - Drzewnictwo*. 1995. Tom 26. Ss. 63—71.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про та апробацію результатів дисертації

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Кузик А. Д., Товарянський В. І. Про пожежну безпеку молодих соснових насаджень. *Пожежна безпека: Збірник наукових праць. ЛДУ БЖД. Львів, 2014. № 24. С. 68—73.*

2. Кузык А. Д., Товарянський В. И. Оценка влажности хвои сосны обыкновенной как фактора пожарной опасности по измерению ее диэлектрической проницаемости. *Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza. Józefów, 2015. Vol. 39, Issue 3. Рр. 111—117.*

3. Кузик А. Д., Товарянський В. І. Масова швидкість вигорання хвої сосни звичайної як показник пожежної безпеки. *Пожежна безпека: Збірник наукових праць. ЛДУ БЖД. Львів, 2014. № 25. С. 57—61.*

4. Кузик А. Д., Товарянський В. І. Математичне моделювання процесів кондуктивного і радіаційного теплообміну під час пожежі в соснових лісах *Пожежна безпека: Збірник наукових праць. ЛДУ БЖД. Львів, 2017. № 30. С. 105—113.*

5. Товарянський В. І., Кузик А. Д., Петровський В. Л. Взаємозв'язок між температурою та часом до займання хвої молодих соснових насаджень. *Пожежна безпека: Збірник наукових праць. ЛДУ БЖД. Львів, 2015. № 26. С. 167—171.*

6. Товарянський В. І., Кузик А. Д. Дослідження пожежі молодих соснових насаджень. *Пожежна безпека: Збірник наукових праць. ЛДУ БЖД. Львів, 2016. № 28. С. 113—120.*

7. Товарянський В. І., Кузик А. Д. Оцінювання залежності пожежної безпеки соснових молодняків від віку. *Науковий вісник НЛТУ України : зб. наук.-техн. праць. Львів, 2016. Вип. 26.5. С. 220—226.*

Апробація матеріалів дисертації:

1. Товарянський В. І. Залежність вологості хвої сосни звичайної від її діелектричної проникності як фактор пожежної безпеки. *Всеукраїнська науково-практична конференції рятувальників: матеріали наук.-практ. конф. (Київ, 23–24 вер. 2014). Київ, 2014. С. 294—296.*

2. Кузик А. Д., Товарянський В. І. Масова швидкість вигорання хвої сосни звичайної як показник пожежної небезпеки. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист*. Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю. (Черкаси, 9–10 жов. 2015). Черкаси, 2015. С. 84—86.

3. Кузык А. Д., Товарянський В. И. Пожароопасные свойства хвои сосны обыкновенной в возрасте молодняка. *Чрезвычайные ситуации: теория, практика, инновации ЧС*: матер.науч-техн.конф. (Кокшетау, 25 мар. 2016). Беларусь, 2016. С. 94—95.

4. Кузик А. Д., Товарянський В. І. Моделювання пожежі соснових молодняків. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій*: матеріали VII Міжнар. наук.-практ. конф. (Черкаси, 19–20 травня). ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. Черкаси, 2016. С. 219—220.

5. Кузик А. Д., Товарянський В. І. Пожежонебезпечні властивості хвойної підстилки соснових молодняків. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій*: матеріали VIII Міжнар. наук.-практ. конф. (Черкаси, 19–20 травня). ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. Черкаси, 2017. С. 206—207.

6. Товарянський В. І., Кузик А. Д. Пожежна небезпека молодих соснових насаджень та шляхи її вирішення. *Проблеми екологічної безпеки*: зб. тез доповідей XIV Міжнародної наук.-практ. конф. (Кременчук, 12–14 жов. 2016) Кременчук, 2016. С. 115.

7. Товарянський В. І., Кузик А. Д. Моделювання пожежі соснових насаджень у молодому віці. *Пожежна та техногенна безпека. Теорія, практика, інновації*: матеріали міжнародної наук.-практ. конф. (Львів. 2016). Львів, 2016. С. 219—220.

8. Товарянський В. І., Кузик А. Д., Драч К. Л. Дослідження пожежної небезпеки підстилки соснових молодняків за умовами погоди. *Сучасний стан цивільного захисту України та перспективи розвитку*: матеріали 19 Всеукраїнської науково-практичної конференції «Технології захисту/ПожТех – 2017» (Київ, 10–11 жовтня). Київ, 2017. С. 428—207.

Патент:

1. Патент на корисну модель 106652 Україна, МПК51 (2016.01) G01N 25/00. Пристрій для дослідження займистості горючого матеріалу з використанням електронагрівального елемента. Бюл. №8. 2016.

ДОДАТОК Б

Протоколи проведення досліджень у лабораторних умовах



**ЛЬВІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БЕЗПЕКИ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ДСНС УКРАЇНИ
НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЛАБОРАТОРІЯ**

Свідоцтво про атестацію № РЛ 1645/10 від 27 вересня 2010 р.
Ліцензія ДДПБ МНС України серія АГ № 506341 від 11.02.2011 р.

ПРОТОКОЛ № 8/8/140216

**«ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-БІОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ
МОЛОДИХ ХВОЙНИХ НАСАДЖЕНЬ З МЕТОЮ ВИЗНАЧЕННЯ ЇХ
ПОЖЕЖОНЕБЕЗПЕКИ»**

Львів - 2014

ПРОТОКОЛ № 8/8/140216
«ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-БІОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МОЛОДИХ
ХВОЙНИХ НАСАДЖЕНЬ З МЕТОЮ ВИЗНАЧЕННЯ ЇХ
ПОЖЕЖОНЕБЕЗПЕКИ»

Дата проведення випробувань: Умови проведення випробувань:

16.02.2014 - 13.03.14 року

-температура 18 °С

- атмосферний тиск 98,8 кПа

- відносна вологість 62 %

МІСЦЕ ПРОВЕДЕННЯ ВИПРОБУВАНЬ: Науково-дослідна лабораторія
 ЛДУ БЖД ДСНС України.

Адреса: м. Львів, вул. Клепарівська, 35.

ОБ'ЄКТ ВИПРОБУВАНЬ: Хвоя сосни звичайної у молодому віці.

ЗРАЗКИ ДЛЯ ВИПРОБУВАНЬ: Підготовлена свіжозірвана хвоя сосни звичайної загальною масою 2,48 г., розділена на окремі зразки по 30 хвоїнок у кожному.

ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИПРОБУВАНЬ ТА ЗАСОБИ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ:

Сушильна камера 2В151 згідно з ТУ 64-1-1411-76, цифровий мультиметр, ваги електронні.

Таблиця 1

Засоби вимірювальної техніки

№ п/п	Найменування приладу чи обладнання	Заводський номер	Границя вимірювання	Клас точності або похибка засобів вимірювальної техніки
1.	Ваги ВТУ 210/СЗ	1825	Від 0.001 до 210 г	3 кл.
2.	Мультиметр UT-601	10324	Від 200 пФ до 20 мФ	2 кл.
3.	Сушильна камера 2В151	2925	Від 20°С до 250°С	—

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ВИПРОБУВАНЬ

1. *Заздалегідь* відібрано хвою та розміщено на горизонтальній площині площині для забезпечення поступового висушування природнім шляхом.
2. *Досліджуються* 5 вірців по 30 хвоїнок.
3. *Вимірювання* маси та ємності здійснюються щодоби в один і той же час для досягнення рівноважної вологості.
4. *Результати* вимірювань фіксуються.

ПОЧАТОК ВИПРОБУВАНЬ

Початком випробування вважали час першого зважування та вимірювання ємності даних п'яти зразків.

ВИМІРЮВАННЯ ТА СПОСТЕРЕЖЕННЯ У ПРОЦЕСІ ВИПРОБУВАНЬ

Вимірювання маси та ємності дослідних зразків.

Масу і ємність кожного з п'яти зразків вимірювали протягом дослідного періоду.

Спостереження за поведінкою зразка.

У процесі випробування спостерігали за зразком і складали хронологічний опис змін у зразку, тобто: маси та ємності з кожним днем.

Під час випробування проводили фотозйомку.



Рис. 1 Порядок проведення дослідження

ПРИПИНЕННЯ ВИПРОБУВАНЬ

Випробування продовжували до тої пори, доки показник маси хвої набув постійного значення.

Після цього хвою досушили у сушильній камері при температурі $100 \pm 5^{\circ}\text{C}$, час досушування реєстрували.

На основі визначення маси сухих вірців проводили розрахунки за результатами досліджень.

РЕЗУЛЬТАТИ

Після закінчення випробувань отримали результати значень (табл.2)

Дата (день, місяць, рік)	Досліджувані зразки [маса, г/ємність, пФ]					Середнє значення
	1	2	3	4	5	
16.02.14	2,64/37,70	2,52/37,80	2,55/36,60	2,37/34,90	2,32/38,60	2,48/37,20
13.03.14	1,20/16,20	1,16/16,00	1,18/16,00	1,09/15,80	1,06/15,90	1,14/15,98

Висновок: на основі проведених досліджень значення ємності та маси хвої змінились, а саме:

- Ємність конденсатора з внесеною між пластинами хвоею зменшилась на **21,22 пФ**;
- Маса хвої зменшилась на **1,34 г**.

Завідувач науково-дослідної
лабораторії



В. Л. Петровський

Науковий керівник
полковник с.п. ц.з.

А. Д. Кузик

Ад'юнкт ЛДУ БЖД
лейтенант с.п. ц. з.

В. І. Товарианський



**ЛЬВІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БЕЗПЕКИ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ДСНС УКРАЇНИ
НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЛАБОРАТОРІЯ**

Свідоцтво про атестацію № РЛ 1645/10 від 27 вересня 2010 р.
Ліцензія ДДПБ МНС України серія АГ № 506341 від 11.02.2011 р.

ПРОТОКОЛ №17/8/150310

**«ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ МІЖ ТЕМПЕРАТУРОЮ ЗАЙМАННЯ
ТА ЧАСОМ ЗАЙМАННЯ ХВОЇ СОСНИ ЗВИЧАЙНОЇ У МОЛОДОМУ ВІЦІ».**

Львів - 2015

ПРОТОКОЛ № 17/8/150310

«ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ МІЖ ТЕМПЕРАТУРОЮ ЗАЙМАННЯ ТА ЧАСОМ ЗАЙМАННЯ ХВОЇ СОСНИ ЗВИЧАЙНОЇ У МОЛОДОМУ ВІЦІ».

Дата проведення випробувань: Умови проведення випробувань:

10.03.2015 - 17.03.15 року

-температура 18 °С

- атмосферний тиск 98,8 кПа

- відносна вологість 60 %

МІСЦЕ ПРОВЕДЕННЯ ВИПРОБУВАНЬ: Науково-дослідна лабораторія ЛДУ БЖД ДСНС України.

Адреса: м. Львів, вул. Клепарівська, 35.

ОБ'ЄКТ ВИПРОБУВАНЬ: Хвоя сосни звичайної у молодому віці.

ЗРАЗКИ ДЛЯ ВИПРОБУВАНЬ: Хвоя сосни звичайної загальною масою 200 г.

ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИПРОБУВАНЬ ТА ЗАСОБИ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ:

Прилад ОТП згідно з ГОСТ 12.1.044-89* «Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения»; ваги електронні.

Таблиця 1

ЗАСОБИ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

№ п/п	Найменування приладу чи обладнання	Заводський номер	Границя вимірювання	Клас точності або похибка засобів вимірювальної техніки
1.	Ваги ВТн 210/СЗ	1825	Від 0.001 до 210 г	3 кл.
2.	Прилад ОТП	0095	Від 0°С до 600°С	2 кл.
3.	Сушильна камера 2В151	2925	Від 20°С до 250°С	—
4.	Мультиметр UT-601	10324	Від 200 пФ до 20 мФ	2 кл.
5.	Секундомір СОП	8625	0-1800 с	2 кл.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ВИПРОБУВАНЬ

1. Заздалегідь відібрано хвою та розміщено на горизонтальній площині для забезпечення поступового висушування природнім шляхом.
2. Досліджуються 4 взірці по 3 г хвої сосни звичайної.
3. Вимірювання маси здійснюються щодоби в один і той же час паралельно із вимірюванням вологості запропонованим методом дієлькометрії.
4. Вимірювання часу займання здійснюється секундоміром.
5. Визначення температури займання здійснюється щодоби в один і той же час. К-ть паралельних дослідів – 5.
6. Результати вимірювань фіксуються у табличній формі.

ПОЧАТОК ВИПРОБУВАНЬ

Початком випробування вважали час першого зважування та дослідження часу займання і температури займання.

Випробування мають продовжуватися до тих пір, доки показники маси хвої та температури займання набудуть сталих значень в межах допустимої похибки.

На основі визначення маси взірців та їх температури займання проводяться розрахунки за результатами досліджень.

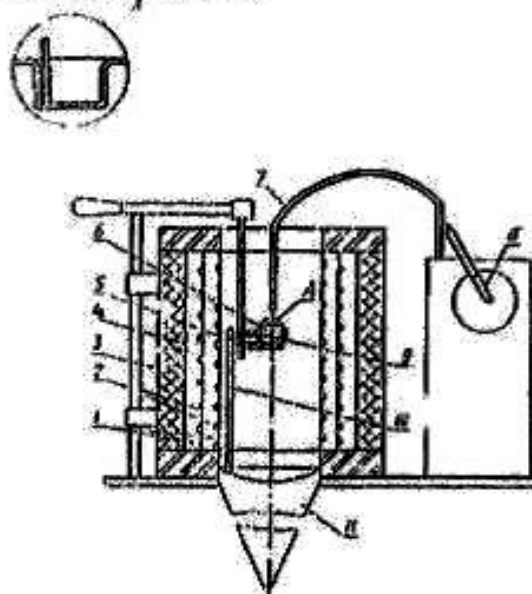


Рис. 1. Прилад ОТП:

1- скляні циліндри, 2- спіральні електронагрівачі; 3 - теплоізоляційний матеріал; 4 - сталевий екран; 5 - тримач зразка; 6 - контейнер; 7 - газовий пальник; 8- електронпальник; 9, 10- термоелектричні перетворювачі; 11 – реакційна камера;

Прилад являє собою вертикальну електропіч із двома коаксіально розташованими циліндрами, які виконано з кварцового скла. Один із циліндрів внутрішнім діаметром (80 ± 3) мм, висотою 240 мм є реакційною камерою; другий циліндр тієї ж висоти має внутрішній діаметр (101 ± 3) мм. На циліндри навиті спіральні електронагрівачі загальною потужністю не менше ніж 2 кВт, що дозволяє створювати температуру робочої зони 600°C за час не більше ніж 40хв.

Випробування з визначення температури займання слід здійснювати за такою послідовністю:

1. Нагрівають реакційну камеру до температури початку розкладу досліджуваної речовини (матеріалу) або до 300°C .

2. Регулюючи подачу газу і повітря до пальника, формують полум'я газового пальника у вигляді клина довжиною (10 ± 2) мм.

3. Витягують з камери тримач з контейнером. У контейнер помішають зразок на час не більше 15 с і вводять його в реакційну камеру. Електропривід газового пальника вмикають в заданий режим роботи.

4. Якщо за випробувальної температури відбувається займання зразка, то фіксують цю температуру і подальше випробування з новим зразком проводять за температури, зменшеної на 50°C . Якщо протягом 20 хв зразок не займається або раніше цього часу повністю припиняється виділення диму, то випробування припиняють і фіксують відмову. За випробувальну температуру приймають показання термомпери, що вимірює температуру зразка.

5. Методом послідовних наближень, використовуючи нові зразки й змінюючи температуру випробування, визначають мінімальну температуру зразка, за якої під час витримки в печі не більше ніж 20 хв зразок займається та горить більше ніж 5 с після видалення пальника, та температуру, меншу за 10°C , за якої займання не відбувається.

За температуру займання матеріалу приймають середнє значення двох температур, що відрізняються не більше як на 10°C , за однієї з яких спостерігається займання трьох зразків, а за іншої - три відмови. Отримане значення температури округлюють з точністю до 5°C .

ВИМІРЮВАННЯ ТА СПОСТЕРЕЖЕННЯ У ПРОЦЕСІ ВИПРОБУВАНЬ

Вимірювання вологості та температури займання дослідних зразків. Вологість, температуру займання та час займання для кожного із зразків вимірювали протягом дослідного періоду.

ПРИПИНЕННЯ ВИПРОБУВАНЬ

Випробування припинили н 7 день проведення експерименту.

РЕЗУЛЬТАТИ

Після закінчення випробувань отримали результати значень (табл.2)

Середнє значення температури та часу до займання хвої сосни звичайної

День проведення експерименту	Температура займання, °C / час до займання, хв			
	Зразки хвої			
	1	2	3	4
1	300/6,09	280/7,33	280/6,08	283/6,59
2	277/2,47	298/4,37	282/4,39	266/5,49
3	290/3,47	257/3,33	270/4,10	266/5,21
4	260/3,29	281/4,36	260/2,42	275/4,02
5	265/2,34	276/3,13	262/4,11	260/3,42
6	260/2,14	256/2,07	270/3,24	246/2,45
7	237/2,52	248/2,02	252/1,53	255/2,23

Висновок: на основі проведених досліджень значення температури займання та часу займання змінились, а саме:

- середнє значення температури займання хвої сосни звичайної на перший день досліджень становило **286 °C**, а на сьомий – **248 °C**;
- середнє значення часу займання хвої сосни звичайної на перший день досліджень становило **6,52 с**, а на сьомий – **2,07 с**.

Завідувач науково-дослідної
лабораторії



В. Л. Петровський

Науковий керівник
полковник сл. ц.з.

А. Д. Кузик

Ад'юнкт ЛДУ БЖД
ст.лейтенант сл. ц. з.

В. І. Товарянський

ДОДАТОК В**Ксерокопія патенту України на корисну модель №106652**



(11) **106652**(19) **UA**(51) МПК (2016.01)
G01N 25/50 (2006.01)
G01N 25/00(21) Номер заявки: **u 2016 01286**(22) Дата подання заявки: **15.02.2016**(24) Дата, з якої є чинними
права на корисну модель: **25.04.2016**(46) Дата публікації відомостей
про видачу патенту та
номер бюлетеня: **25.04.2016,**
Бюл. № 8(72) Винахідники:
Товарянський Володимир
Ігорович, UA,
Кузик Андрій Данилович, UA,
Стасьо Роман Іванович, UA,
Коваль Мирослав
Миронович, UA(73) Власники:
Товарянський Володимир
Ігорович,
вул. Б. Хмельницького, 275-А,
кв. 82, м. Львів, 79037, UA,
Кузик Андрій Данилович,
вул. Миколайчука, 10, кв. 46,
м. Львів, 79059, UA,
Стасьо Роман Іванович,
вул. Загірна, 53, м. Львів,
79037, UA,
Коваль Мирослав
Миронович,
вул. Дубова, 44-а, м. Львів,
79067, UA

(54) Назва корисної моделі:

ПРИСТРІЙ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЙМИСТОСТІ ГОРЮЧОГО МАТЕРІАЛУ З ВИКОРИСТАННЯМ
ЕЛЕКТРОНАГРІВАЛЬНОГО ЕЛЕМЕНТА

(57) Формула корисної моделі:

Пристрій для дослідження займистості горючого матеріалу з використанням електронагрівального елемента, який відрізняється тим, що при його використанні можна досліджувати займистість матеріалів в широкому діапазоні температур; наявність автономного джерела живлення дає змогу застосовувати пристрій на об'єктах з відсутнім електроживленням, а наявність стабілізованого регулятора струму дає можливість змінювати температуру електронагрівального елемента; застосування ніхромового провідника як електронагрівального елемента дає змогу отримувати високу температуру та нагрівати горючий матеріал, не зазнаючи суттєвих деформацій і зберігаючи не лише стабільність форми, але й експлуатаційні характеристики та надійність у використанні.

(11) 106652

Пронумеровано, прошито металевими
люверсами та скріплено печаткою

2 арк.

25.04.2016

Уповноважена особа



(підпис)

ДОДАТОК Д

Акти впровадження результатів дисертаційної роботи

ЗАТВЕРДЖУЮ
 Директор ДП «Рава-Руське
 лісове господарство»
 Косовський А. П.
 2016 р.



АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи
 Товарянського Володимира Ігоровича

Комісія у складі:

Голови комісії – головного лісничого – Музики Михайла Миколайовича
 та членів комісії:

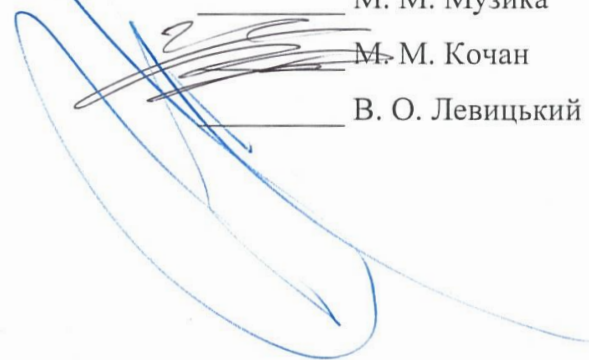
лісничого – Кочана Мирона Михайловича;

головного інженера – Левицького Володимира Олександровича склала
 цей акт про використання матеріалів дисертаційної роботи ад'юнкта
 Львівського державного університету безпеки життєдіяльності Товарянського
 Володимира Ігоровича та стверджує, що запропонована шкала оцінювання
 пожежної небезпеки впроваджена в діяльність ДП «Рава-Руське лісове
 господарство» з метою планування протипожежних заходів у лісових
 насадженнях першого класу природної пожежної небезпеки.

Голова комісії

Члени комісії

 М. М. Музика
 М. М. Кочан
 В. О. Левицький



ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор Турківського ДЛГП

«Галсільліс»

Петренко Б.С.

14.08.2017р.



АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи

Товарянського Володимира Ігоровича

Комісія у складі голови – головного лісничого Турківського ДЛГП «Галсільліс» Сухович Р.Я., лісничого Богайчик Р.І., інженера Хомик М.І., а також завідувача науково-дослідної лабораторії пожежної безпеки Петровського В. Л., та завідувача науково-дослідної лабораторії екологічної безпеки Сиси Л. В. Львівського державного університету безпеки життєдіяльності встановили, що «Пристрій для дослідження займистості горючого матеріалу з використанням електронагрівального елемента» (ПДЗМ) в кількості 3 (три) шт., а також реалізована на його основі методика дослідження параметрів пожежної небезпеки за результатами дисертаційної роботи ад'юнкта Львівського державного університету безпеки життєдіяльності Товарянського Володимира Ігоровича використовуються в Турківському ДЛГП «Галсільліс» для прогнозування стану пожежної небезпеки, зокрема дослідження процесів займання лісової підстилки у лісових насадженнях першого класу природної пожежної небезпеки.

Голова комісії

Члени комісії

 Р.Я.Сухович
 М.І.Хомик
 Р.І.Богайчик
 В. Л. Петровський
 Л. В. Сиса

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор Львівського
державного університету безпеки
життя та діяльності з науково-
педагогічної роботи



М. С. Коваль

2017 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ**результатів дисертаційної роботи**

Комісія у складі заступника начальника навчально-наукового інституту цивільного захисту, к.ф.-м.н., доц. Меньшикової О.В., завідувача кафедри екологічної безпеки, к.геол.н., доц. Карабина В.В., доцента кафедри екологічної безпеки, к.т.н. Хром'як У.В. встановила, що результати дисертаційної роботи Товарянянського Володимира Ігоровича на тему "Підвищення ефективності забезпечення пожежної безпеки в молодих соснових лісах України" за спеціальністю 21.06.02 – пожежна безпека (на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук) використовуються в навчальному процесі при викладанні на кафедрі екологічної безпеки навчальних дисциплін "Небезпечні природні процеси" для бакалаврів за спеціальністю "Пожежна безпека" та "Лісова пірологія" для бакалаврів за спеціальністю "Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування". В лекційних курсах навчальних дисциплін використані теоретичні положення та методичні підходи дисертаційної роботи щодо уточненого оцінювання пожежної небезпеки соснових молодняків, властивостей лісових горючих матеріалів рослинного походження і моделювання поширення лісових пожеж у середовищі WFDS.

Заступник начальника навчально-наукового
інституту цивільного захисту, к.ф.-м.н., доц.

О. В. Меньшикова

Завідувач кафедри екологічної безпеки,
к.геол.н., доц.

В.В.Карабин

Доцент кафедри екологічної безпеки, к.т.н.

У.В.Хром'як