Исследована проблема создания инструмента анализа и расчета пространственных параметров зон с повышенной активностью культурно-бытовых связей. Именно в этих зонах формируется контингент населения, существенно влияющего на расчетную вместимость учреждения обслуживания и условия его размещения в планировочной структуре города. Разработана технология компьютерной визуализации данных распределения поля интенсивности тяготения населения (ИТН) к объектам торгово-бытового обслуживания в среде ArcGIS и MATLAB на основе экспериментально установленного закона ИТН. Представлены результаты моделирования векторного поля градиента ИТН, которое отражает скорость изменения величин интенсивности тяготения населения в некоторой точке градостроительного пространства к объекту торговли.

Ключевые слова: поле градиента интенсивности тяготения населения, объект общественного обслуживания, компьютерная модель, полевая модель, город.

Hoblyk A.V. **Technology of Simulation of the Gradient Field of Intensity of Gravitation Pull on Population to Public Service Facilities**

The article is devoted to the instrument design for analysis and calculation of spatial parameters of zones with excessive activity of cultural and social connections. In these areas the contingent of the population is formed, which significantly affects the estimated capacity of the service object and its conditions of location in the city planning structure. We represent the technique of data visualization of the distribution of the field of intensity of gravitational pull on population (IGP) to the objects of trade and consumer services in the ArcGIS and MATLAB software and are based on the law IGP, which is experimentally established. The main result of the work is the simulation results of the vector field of the gradient IGP, which reflects the rate of change of the intensity of gravitational pull on population at some point in urban space to the retail outlet.

Keywords: gradient field of intensity of gravitational pull on population, retail outlet, field model, computer model, city.

УДК 614.843(075.32) Докторант О.М. Коваль, канд. техн. наук – НУ цивільного захисту України; проф. Е.М. Гуліда, д-р техн. наук – Львівський ДУ БЖД

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВИБОРУ ОПТИМАЛЬНОЇ ТАКТИКИ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ НА СКЛАДАХ ЛІСОМАТЕРІАЛІВ ДЕРЕВООБРОБНИХ ПІДПРИЄМСТВ

Розроблено математичну модель, блок-схеми алгоритму та програмне забезпечення для оптимізації вибору тактики локалізації та гасіння пожеж на відкритих складах лісоматеріалів деревообробних підприємств. Модель містить усі необхідні залежності для встановлення оптимального часу локалізації та гасіння пожежі з урахуванням впливу швидкості та напряму дії вітру, що призводить до зміни швидкості розповсюдження полум'я пожежі. Окрім цього, математична модель дає змогу обґрунтовано визначати оптимальний варіант тактики і тривалості локалізації та гасіння пожежі з необхідною при цьому кількістю сил і засобів та необхідними для ліквідації пожежі газодимозахисним спорядженням і термозахисним одягом. Наукова новизна полягає в тому, що вперше за допомогою оптимізаційної математичної моделі розглянуто та обґрунтовано основні положення тактичних дій системи пожежогасіння на відкритих складах лісоматеріалів деревообробних підприємств.

Ключові слова: математична модель, тактика локалізації та гасіння пожежі, пожежний ствол, теплова радіація.

Постановка проблеми. Пожежі на відкритих складах лісоматеріалів є найбільш небезпечними пожежами. Такі пожежі переважно мають вигляд масової пожежі. Вивчення цих пожеж і способів їх гасіння на відкритих складах лісоматеріалів розпочато в Росії в 50-60 роки минулого століття з використанням результатів експериментальних досліджень на натурних об'єктах. Результати цих робіт опубліковано в **[**1, 2**]**. Пожежі на складах лісоматеріалів характеризуються розкидом іскор і головешок на значні відстані. Автори цих робіт зазначають, що середня швидкість розповсюдження вогню в разі пожежі на складах круглого лісу становить 0,23-0,36 м/хв. З початку 80-х років у ВНДІПО (Росія) почали розробляти методи математичного моделювання розвитку пожеж на відкритих складах лісоматеріалів. При цьому розглядали поширення пожежі за рахунок теплової радіації, конвекції, а також переносу іскор і головешок вітром **[**3**]**. Але водночас зовсім не розглядали питання застосування методів математичного моделювання тактичних дій локалізації та гасіння пожеж на відкритих складах лісоматеріалів. Тому виникнення пожежі та її несвоєчасна ліквідація призводять до значних збитків.

Зменшення таких збитків можливе тільки за оперативного та якісного виконання оптимально необхідних тактичних прийомів підрозділами державної служби надзвичайних ситуацій для швидкої локалізації та гасіння пожежі. Безумовно, для реалізації такої умови необхідно керівнику гасіння пожежі (КГП) мати дуже великий практичний досвід та необхідний довідниковий науково обґрунтований матеріал для швидкого прийняття оптимальних рішень в умовах невизначеності.

Існують нормативні документи для орієнтовного визначення тривалості гасіння пожежі, які враховують багаточисельні статистичні дані **[**4**]**. Але в кожному конкретному випадку такий підхід не може бути обґрунтованим. Тому виникає проблема у більш точному прогнозуванні часу ліквідації пожежі, на значення якого насамперед впливає оптимальний для конкретних умов варіант тактичних дій під час локалізації та гасіння пожежі. Вирішення такої проблеми можливе передусім за рахунок розроблення і можливості оперативного використання КГП математичної моделі вибору оптимальних тактичних прийомів для локалізації та гасіння пожеж на відкритих складах лісоматеріалів деревообробних підприємств. Враховуючи той факт, що для локалізації та гасіння пожеж на відкритих складах лісоматеріалів деревообробних підприємств математичні моделі тактичних прийомів відсутні, то вирішення цієї проблеми є актуальним і своєчасним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Перші кроки зі встановлення вимог до виконання максимального обсягу тактичних робіт на пожежі розглянуто в роботі **[**4**]**, що стало основою для прийняття відповідних обмежень у процесі розроблення математичних моделей для оптимального розміщення сил і засобів локалізації пожежі. Під час розроблення оптимізаційних моделей стосовно визначення сил і засобів для гасіння пожежі необхідно приймати відповідні критерії. Вибір обґрунтованих критеріїв прийняття відповідних рішень розглянуто в роботах **[**5, 6**]** при розгляді гасіння пожеж у резервуарних парках нафтопродуктів.

Вперше моделювання дій пожежних підрозділів з локалізації пожеж в резервуарних парках розглянуто в роботах **[**7, 8**]**. Автори розглядають питання про найкраще розміщення пожежних стволів у процесі локалізації пожежі. Зас-

тосування моделювання для розроблення плану тактичних дій локалізації пожежі дало змогу зменшити втрати від пожежі на 40 % порівняно зі загальноприйнятим підходом.

Стосовно відкритих складів лісоматеріалів деревообробних підприємств подібних математичних моделей, як показав аналіз публікацій, досліджень не було. Тому потрібно розробити математичну модель, яка б дала змогу, виходячи з умов пожежі, приймати оптимальний тактичний план розміщення сил і засобів для локалізації та гасіння пожежі на відкритих складах лісоматеріалів деревообробних підприємств.

Мета роботи. Розробити математичну модель, блок-схему алгоритму і пакет прикладних програм для вибору оптимального тактичного плану локалізації та гасіння пожеж на відкритих складах лісоматеріалів деревообробних підприємств.

Постановка задачі та її розв'язання. Постановку задачі будемо будувати з використанням рекомендацій **[**9**]**, на підставі яких розглянемо план розташування штабелів одного кварталу складу круглих лісоматеріалів штабельного зберігання. Згідно з цими рекомендаціями площа кварталу груп штабелів круглих лісоматеріалів має становити не більше 4,5 га. Ширина кожної групи штабелів у кварталі може бути не більшою ніж 50 м, а кварталу – не більшою ніж 100 м. Групи штабелів круглих лісоматеріалів у кварталі потрібно відокремлювати між собою поздовжніми і поперечними розривами. Ширина поздовжніх розривів повинна бути не менша від полуторної висоти, а поперечних – не менша від однієї висоти штабелів. По поздовжніх розривах доцільно передбачати тверде покриття завширшки не менше 3 м для проїзду пожежних машин. Відстані від штабелів круглих лісоматеріалів до середини зазначених доріг потрібно приймати з урахуванням кута природного розсипання штабелів у разі пожежі, але не менше 8 м. На підставі розглянутих рекомендацій план розташування штабелів одного кварталу складу круглих лісоматеріалів штабельного зберігання зображено на рис. 1.

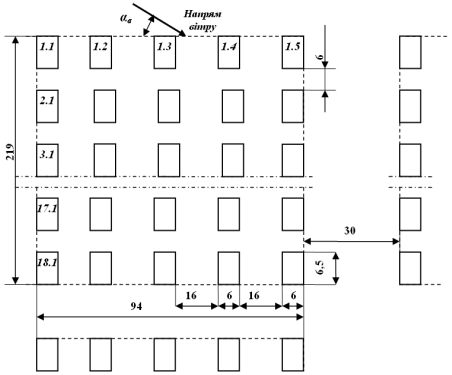

Рис. 1. План кварталу складу круглих лісоматеріалів штабельного зберігання

Основні параметри кварталу складу: штабелі згідно з рекомендаціями **[**10**]** розміром $b \times l \times h$ = 6×6,5×6 м; ширина поздовжніх розривів між штабелями

$b_п$ = 16 м; ширина поперечних розривів між штабелями $b_{поп}$ = 6 м; загальна кількість поздовжніх рядів кварталу 5 сумарною шириною $B_к$ = 94 м; загальна кількість поперечних рядів 18 сумарною довжиною $L_к$ = 219 м; загальна площа кварталу 20586 м^2 ≈ 2 га; протипожежні розриви між кварталами за висоти штабелів 6 м дорівнюють 30 м.

Першочерговим завданням процесу гасіння пожежі є її локалізація, від успішного виконання якої залежить швидкість процесу гасіння. Відомо, що існує значна кількість позицій розміщення сил і засобів для проведення процесу локалізації. Тому виникає задача визначення найкращої (оптимальної) позиції їх розміщення. Під час розміщення пожежних стволів необхідно враховувати їх місця розташування, які давали б змогу подавати струмінь на необхідну глибину від фронту пожежі. Окрім цього, треба також брати до уваги можливу довжину рукавної лінії. Необхідно також забезпечувати правила охорони праці для пожежних у процесі локалізації та гасіння пожежі.

Математична постановка задачі оптимізації. Для формулювання оптимізаційної задачі необхідно насамперед прийняти функцію мети, яка впливає на величину витрат від пожежі. Такими чинниками, які впливають на значення витрат у процесі ліквідації пожежі, є час локалізації пожежі $\tau_{лок}$ та тривалість гасіння $\tau_г$ в хв. У цьому випадку функція мети буде як сума цих чинників, яка повинна мати мінімальне значення

$$\tau_{лок} + \tau_г \Rightarrow \min . \qquad (1)$$

Значення цих чинників визначаємо за залежностями **[**11**]**:

$$\tau_{лок} = \frac{6,39 S_{лок}^{0,893}}{2N_A + N_B^{\Gamma}} K_I K_d ;\ \tau_г = \tau_{лок}\left(\frac{S_П}{S_{лок}} - 1\right), \qquad (2)$$

де: $S_{лок}$ – площа локалізації, м^2; K_I – коефіцієнт, який враховує інтенсивність подання $I_п^{\Gamma}$ (л/м^2 с) в осередок пожежі вогнегасної речовини; K_d – коефіцієнт, який враховує вплив діаметра насадки d (мм) ствола (рекомендоване значення діаметра насадки для ручних стволів N_B d = 13 мм; для стволів N_A d = 19 мм; для розрахунку приймають середнє значення d = 16 мм); для кругової і кутової пожеж $S_{лок} = [2V_{Пв}(\tau_{в.г} - 5)h_г - h_г^2]\alpha$; $h_г$ – глибина подачі вогнегасної речовини в осередок пожежі ($h_г$ = 5 м для ручних стволів **[**4**]**); $K_I = 1,62 - 3,04 I_п^{\Gamma}$; $K_d = 1,4983 - 0,0262d$; α – кутовий коефіцієнт, який враховує форму пожежі: кругова (360 º) α = 3,14 рад; кутова (180 º) α = 1,57 рад; кутова (90 º) α = 0,785 рад; $V_{Пв}$ – найбільш вірогідна швидкість розповсюдження полум'я штабелем, м/хв;

$$V_{Пв} = 60 V_П K_в K_\alpha ; \qquad (3)$$

$V_П$ – швидкість розповсюдження полум'я штабелем, м/с; $K_в$ – коефіцієнт, який враховує вплив швидкості вітру на швидкість розповсюдження полум'я штабелем

$$K_в = 0,9912 \exp(0,0388 V_в); \qquad (4)$$

$V_в$ – швидкість вітру, м/с; K_α – коефіцієнт, який враховує вплив напряму дії вектора швидкості вітру на швидкість розповсюдження полум'я штабелем

$$K_\alpha = -5 \cdot 10^{-5} \alpha_в^2 + 0,0123 \alpha_в + 0,374 ; \qquad (5)$$

$\alpha_в$ – кут напрямку вітру (за $\alpha_в$ = 90 º розглядається попутний напрямок вітру, який збігається з повздовжнім або поперечним розміщенням штабелів кварталу (рис. 1) і переміщує пожежу на квартал; за $\alpha_в$ = 270 º – зустрічний напрямок вітру; окрім цього, у разі виникнення пожежі периметром кварталу, попутний напрямок вітру необхідно розглядати з тієї з чотирьох сторін кварталу, на якій виникла пожежа; у разі виникнення пожежі в центрі кварталу, необхідно розглядати тільки попутний напрям вітру), град; $\tau_{в.г}$ – тривалість вільного розвитку пожежі, хв.

Для визначення площі пожежі $S_П$ скористуємося результатами аналізу виникнення пожеж на складах лісоматеріалів деревообробних підприємств, які показали, що існує велика кількість можливих пожежних ситуацій, але в більшості випадків (86 %) вони відповідають тринадцяти пожежним ситуаціям, які зображено на рис. 2 **[**12**]**. Розмістивши квартал складу лісоматеріалів у системі координат *XY* (див. рис. 2), визначимо координати розміщення кожної пожежної ситуації: 1(0; $L_к$); 2($B_к$; $L_к$); 3(0; 0); 4($B_к$; 0); 5(0,5$B_к$; $L_к$); 6(0; 0,75$L_к$); 7($B_к$; 0,75$L_к$); 8(0; 0,5$L_к$); 9($B_к$; 0,5$L_к$); 10(0; 0,25$L_к$); 11($B_к$; 0,25$L_к$); 12(0,5$B_к$; 0); 13(0,5$B_к$; 0,5$L_к$). Для кожної пожежної ситуації залежно від площі пожежі можливі різні тактичні плани розміщення сил і засобів для локалізації та гасіння пожежі.

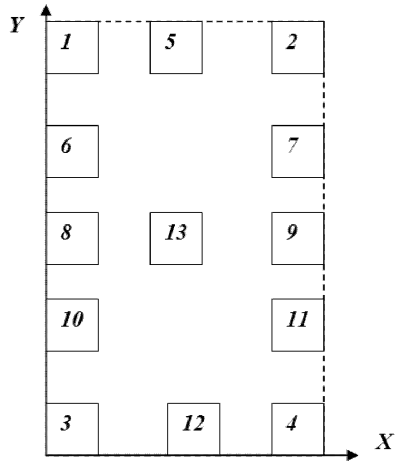

Рис. 2. Схема кварталу складу лісоматеріалів деревообробного підприємства з можливими пожежними ситуаціями

Аналізуючи схему кварталу складу лісоматеріалів (див. рис. 2) можна зауважити, що в разі виникнення пожежі на ділянках 1, 2, 3, і 4 є кутовими 90 º, на ділянках 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 – кутовими 180 º, а на ділянці 13 – кругова 360 º. У цьому випадку площі пожежі можна визначити за залежностями:

- кутова пожежа 90 º (ділянки складу: 1, 2, 3, 4)

$$S_П = 16,67n^{1,18}bl\text{, м}^2; \quad (6)$$

- кутова пожежа 180 º (ділянки складу: 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12)

$$S_П = 22,29n^{1,34}bl\text{, м}^2; \quad (7)$$

- кругова пожежа 360 º (ділянка складу 13)

$$S_П = 29,72n^{1,35}bl\text{, м}^2, \quad (8)$$

де n – кількість груп загорянь штабелів залежно від форми пожежі

$$n = \frac{0,25V_{Пв}\tau_{в.г}}{\sqrt{\frac{bl + 2h(b+l)}{\alpha}}}. \quad (9)$$

Визначаємо кількість пожежних стволів для подачі вогнегасної речовини в осередок пожежі. Для цього скористуємося рекомендаціями роботи **[**13**]**. На підставі цих рекомендацій (Q_B = 3,7 л/с; $I_n^Г$ = 0,2 л/м^2 с) визначаємо кількість стволів B на гасіння ($N_B^Г$) і захист ($N_B^З$)

$$N_B^Г = 0,054S_П;\ N_B^З = 0,027S_П. \quad (10)$$

Кількість стволів A (N_A) на локалізацію і гасіння від загальної кількості стволів $N_B^Г$ на підставі рекомендацій **[**4**]**

$$N_A = 0,3N_B^Г. \quad (11)$$

Одночасно проведено дослідження надійності пожежної техніки з використанням методу статистичного моделювання, на підставі результатів яких встановлено, що імовірність безвідмовної роботи всієї системи для пожежогасіння не перевищує $R_c(\tau)$ = 0,8473. Тоді необхідну дійсну кількість стволів для ліквідації пожежі визначають так:

$$\left(N_B^Г\right)_д = \frac{N_B^Г}{R_c(\tau)};\ \left(N_B^З\right)_д = \frac{N_B^З}{R_c(\tau)};\ (N_A)_д = \frac{N_A}{R_c(\tau)}; \quad (12)$$

$$N_B = (N_B^Г)_д + (N_B^З)_д; \quad (13)$$

$$N_\Sigma = (N_B^Г)_д + (N_B^З)_д + (N_A)_д. \quad (14)$$

Основною тактико-технічною характеристикою розглянутих пожежних стволів є дальність подачі суцільного струменя, яка змінюється в межах L_{max} = 28-32 м. Одночасно визначаємо потрібну кількість відділень $N_в$ для ліквідації пожежі

$$N_в = 0,25(2(N_A)_д + N_B + 0,17N_\Sigma + 2), \quad (15)$$

а також загальну кількість пожежних автоцистерн і спеціальних машин:

- пожежних автоцистерн

$$N_{п.а} = N_в; \quad (16)$$

- спеціальних машин $N_{N.c}$ залежно від загальної кількості працівників N_N, які перебувають на території кварталу складу, де виникла пожежа

$$N_{п.с} = 0,011N_п \geq 1. \quad (17)$$

Після розгляду функції мети переходимо до визначення критерію оптимізації. За критерій оптимізації вибору тактики локалізації та гасіння пожежі, згідно із рекомендаціями **[**14**]**, приймаємо втрати як для об'єкта B_o, так і для пожежно-рятувальних підрозділів $B_п$, які мають бути мінімальними:

$$B_o + B_п \Rightarrow \min; \quad (18)$$

$$B_o = C_o V_{пв}^2 \alpha(\tau_{в.г}^2 - 20\tau_{в.г} + 0,25\tau_{лок}^2 + 125); \quad (19)$$

$$B_n = C_n \tau_{злл} N_в; \quad (20)$$

$$\tau_{з.п.п} = \tau_{о.о} + \tau_{з.с} + \tau_{зб} + \tau_{сл} + \tau_{роз} + \tau_{лок} + \tau_г + \tau_{лік}, \quad (21)$$

де: C_o – вартість одного м^2 площі об'єкта, яка знищена пожежею, грн/м^2; C_n – вартість однієї хвилини роботи одного пожежно-рятувального відділення у процесі ліквідації пожежі, грн/хв; $\tau_{з.п.п}$ – прогнозований час зайнятості пожежно-рятувального підрозділу для ліквідації пожежі, хв; $\tau_{о.о}$ – час на отримання та опрацювання сповіщення про пожежу, хв; $\tau_{з.с}$ – час на залучення сил і засобів гарнізону для гасіння пожежі, хв (наказ МВ*С* України №325 від 01.07. 1993); $\tau_{зб}$ – час збирання особового складу, хв; $\tau_{сл}$ – час слідування на пожежу, хв;

$$\tau_{сл} = \frac{60Lk_н}{V_{сл}}, \quad (22)$$

де: L – відстань від пожежно-рятувальної частини до об'єкта, на якому виникла пожежа, км; $k_н$ – коефіцієнт, який враховує не прямолінійність вуличної мережі (у містобудівельній практиці його максимальне значення приймають $k_н$ = 1,4); $V_{сл}$ – середня швидкість руху пожежних автомобілів, км/год (у денний час $V_{сл}$ = 32 км/год; вночі – до 60 км/год **[**15**]**); $\tau_{роз}$ – час оперативного розгортання, хв; $\tau_{лік}$ = 0,25($\tau_{лок}$ + $\tau_г$) – час на закінчення ліквідації пожежі (остаточне гасіння), хв.

Значення складових $\tau_{о.о}$, $\tau_{з.с}$, $\tau_{зб}$, $\tau_{роз}$ наведено в роботі **[**16**]** та в нормативному документі **[**17**]**. Визначивши критерій оптимізації, переходимо до встановлення обмежень під час виконання тактичних дій для ліквідації пожежі. Першими основними обмеженнями є використання пожежних стволів $(N_B^Г)_∂$, $(N_A)_∂$ для гасіння і $(N_B^2)_∂$ для захисту. Мінімальна кількість цих стволів може бути відповідно $a_1 = a_2 = a_3 = 1$. Такий підхід можна обґрунтувати тим, що під час приїзду першої пожежної автомашини, на якій знаходиться одна ланка, після оперативного розгортання можна залучити до локалізації пожежі тільки таку кількість засобів пожежогасіння. Максимальну кількість цих стволів відповідно b_1, b_2, b_3 для ліквідації пожежі визначають залежності (10) − (12).

Наступним істотним обмеженням для забезпечення функції мети є тривалість вільного розвитку пожежі $\tau_{в.г}$. Мінімальне значення обмеження a_4 на $\tau_{в.г}$ можна визначити на підставі багаточисельного аналізу цього чинника за залежністю

$$a_4 = \frac{60Lk_н}{V_{сл}} + 20,5, \text{ хв}, \quad (23)$$

а максимальне значення обмеження b_4 на $\tau_{в.г}$ приймаємо з урахуванням прогнозованого максимально можливого значення часу вільного горіння

$$b_4 = \frac{60Lk_н}{V_{сл}} + 29, \text{ хв}. \quad (24)$$

У процесі ліквідації пожежі кожного пожежного зобов'язують у разі виникнення у зоні пожежі небезпечних для життєдіяльності чинників використовувати згідно із наказом № 1342 від 16.12.2011 р. МНС України газодимозахисне спорядження та захисний одяг. Тому наступним обмеженням для ліквідатора

пожежі є відстань l_q від фронту пожежі до пожежного зі стволом, яка б забезпечувала мінімальне значення дії на нього теплової радіації q в кВт/м^2. Для захисту органів дихання та зору під час роботи в непридатному для дихання середовищі необхідно використовувати апарат на стисненому повітрі SCBA ProffAir APS/4. Захист пожежного від теплової радіації необхідно виконувати за рахунок використання термозахисних костюмів "Індекс-1", "Індекс-3" та "Індекс-1200", які дають змогу працювати за температури 200ºС упродовж 15 хв, а термозахисний костюм "Індекс-1200" – за температури 1200º*С* до 5 хв.

Для визначення значення q отримано емпіричну залежність на підставі аналізу результатів розрахунків за залежностями для визначення густини теплового потоку за законом Стефана-Больцмана, температури факелу полум'я та площі пожежі. За результатами статистичного оброблення результатів розрахунків отримано залежність

$$q = \frac{90\sqrt[3]{S_П}}{\sqrt{l_q^3}}, \text{ кВт/м}^2. \quad (25)$$

На значення l_q встановлюємо обмеження залежно від мінімально можливої відстані пожежного від фронту пожежі ($l_{q\min}$ = 5 м = a_5) та максимально можливої відстані $l_{q\max} = b_5 = L_{\max} - h$, яка залежить від максимальної довжини $L_{\max}$ подачі пожежним стволом суцільного струменя вогнегасної рідини і глибини h подачі вогнегасної речовини в осередок пожежі при її локалізації.

Після розгляду всіх обмежень, які впливають на розміщення сил і засобів для успішної локалізації та гасіння пожежі, переходимо до розгляду тактичних дій пожежно-рятувальних підрозділів для виконання цього процесу. Для гасіння пожеж на лісоскладах штабельного зберігання головним чином використовують воду **[**22**]**. Тому в момент прибуття пожежно-рятувальних підрозділів на об'єкт, де виникла пожежа, у процесі їх оперативного розгортання насамперед необхідно поставити пожежні автоцистерни на найближчі вододжерела і розгорнути пожежні рукава від вододжерел до осередку пожежі, зокрема від гідрантів кільцевої господарчо-пожежної магістралі високого тиску. У разі виникнення пожежі в місцях складу 1-13 (див. рис. 2) можливі такі варіанти тактики локалізації пожежі

Тактичний варіант 1. У разі виникнення пожежних ситуацій 1, 2, 3 і 4 (кутова пожежа 90 º) розміщення сил і засобів пожежогасіння виконують периметром фронту пожежі з обов'язковим виділенням стволів B на захист сусідніх штабелів від займання, які знаходяться в середині кварталу. Окрім цього, необхідно враховувати напрямок вітру. За напрямку вітру на квартал лісоскладу вирішальний напрямок локалізації пожежі потрібно спрямувати проти вітру. За відсутності вітру сили пожежогасіння можна розмістити рівномірно периметром фронту пожежі.

Тактичний варіант 2. У разі виникнення пожежних ситуацій 5-12 (кутова пожежа 180 º) розміщення сил і засобів пожежогасіння виконують по фронту пожежі з обов'язковим виділенням стволів B на захист сусідніх штабелів від займання, які знаходяться в середині кварталу. Для спрощення оперативного розгортання половина пожежних автоцистерн має бути розміщена на продольних

розривах складу на небезпечній відстані з боку переміщення фронту пожежі та з обов'язковим перекачуванням до них води від вододжерел. За напрямку вітру на квартал лісоскладу вирішальний напрямок локалізації пожежі потрібно спрямувати проти вітру. За відсутності вітру сили пожежогасіння можна розмістити рівномірно периметром фронту пожежі.

Тактичний варіант 3. У разі виникнення пожежної ситуації 13 (кругова пожежа 360 °) розміщення сил і засобів пожежогасіння виконують по двох протилежно розміщених фронтах пожежі, яка виникла в центральній частині складу лісоматеріалів, в яких відсутня пожежа. Захист сусідніх штабелів від займання виконують по всьому периметру пожежі. При цьому більшу частину стволів B потрібно розмістити проти вітру. Вирішальний напрямок локалізації пожежі потрібно спрямувати проти вітру. Для зменшення тривалості часу оперативного розгортання пожежні автоцистерни мають бути розміщені на продольних розривах складу на небезпечній відстані від фронтів пожежі та з обов'язковим перекачуванням до них води від вододжерел. Більша частина пожежних автоцистерн має бути розміщена на складі на стороні фронту пожежі, який переміщується з напрямком вітру. За відсутності вітру сили пожежогасіння можна розмістити рівномірно периметром фронту пожежі.

Окрім цього, під час виконання кожного тактичного варіанта необхідно насамперед збивати полум'я із зовнішніх поверхонь штабеля, щоб зменшити вплив теплового випромінювання, з одночасною подачею суцільних струменів всередину деревини штабеля з торцевої сторони з метою їх проливання вогнегасною рідиною. Після розгляду питань, які пов'язані з математичною постановкою задачі оптимізації, переходимо до розроблення оптимізаційної математичної моделі тактики локалізації та гасіння пожежі.

Вхідні дані: 1) координата пожежі I (x; y), де I = 1, 2, … 13 – номер можливої пожежної ситуації; 2) $V_П$ – лінійна швидкість розповсюдження полум'я пожежі, м/с; 3) швидкість вітру $V_в$, м/с; кут дії вітру $\alpha_в$, град; 4) тип ствола N_B та $L_{\max}$; тип ствола N_A та $L_{\max}$; 5) тип термозахисних костюмів і апаратів для захисту органів дихання та зору під час роботи в непридатному для дихання середовищі, вибір яких залежить від густини теплового потоку q; 6) тактичні варіанти розміщення сил і засобів локалізації та гасіння пожежі, кожен з яких вибирають залежно від координати пожежі I (x; y); 7) значення обмежень a_i і b_i, які необхідно визначити заздалегідь; 8) **[**p**]** – допустиме значення імовірності для прийняття оптимального значення функції мети.

Функція мети

$$\tau_{лок i} + \tau_{г i} \Rightarrow \min; \quad (26)$$

за критерієм

$$B_{o i} + B_{n i} \Rightarrow \min; \quad (27)$$

за обмеженнями

$$a_1 \le (N_B^{\Gamma})_{\partial i} \le b_1; \quad (28)$$

$$a_2 \le (N_A)_{\partial i} \le b_2; \quad (29)$$

$$a_3 \le (N_B^{\ni})_{\partial i} \le b_3; \quad (30)$$

$$a_4 \le \tau_{в.г i} \le b_4; \quad (31)$$

$$a_5 \le l_{qi} \le b_5; \quad (32)$$

$$p_i \ge [p], \quad (33)$$

де: p_i – імовірність потрапляння досліджуваної i-тої точки в область допустимих розв'язків ($p_i = k / N$, де K – кількість циклів роботи програми, за яких досліджувані точки потрапили в область допустимих розв'язків; N – загальна кількість циклів роботи програми); **[**p**]** – допустиме значення імовірності, від значення якого залежить кількість досліджень для прийняття оптимального значення.

Для розв'язування оптимізаційної моделі скористуємося методом Монте-Карло **[**18**]**. Область допустимих розв'язків, яка визначається обмеженнями (28)-(32), оточують т-мірним паралелепіпедом, в якому проводимо дослідження. Поставлену задачу найкраще розв'язувати з використанням ПЕОМ. За допомогою генератора комп'ютера утворюють послідовність псевдовипадкових чисел μ_{ji} в інтервалі 0-1. Для перетворення псевдовипадкових чисел μ_{ji}, які рівномірно розподілені в інтервалі 0-1, до значень $(N_B^{\Gamma})_{\partial.i}$, $(N_A)_{\partial.i}$, $(N_B^{\ni})_{\partial.i}$, $\tau_{в.г.i}$ та l_{qi} використовуємо залежності виду, наприклад, як для l_{qi}

$$l_{qi} = a_5 + \mu_{5i}(b_5 - a_5),$$

де μ_{5i} – псевдовипадкове число для визначення чинника l_{qi} на певному i-тому циклі розрахунку.

У процесі розрахунку на кожному циклі роботи програми визначаються значення $\tau_{лок.i}$ і $\tau_{г.i}$ за залежностями (2) та критеріїв $B_{o.i}$ і $B_{n.i}$, які перевіряються зі значеннями попереднього циклу. Ці процедури виконуються доти, поки буде виконана умова (33). Після завершення роботи програми на друк видаються такі дані: $S_{Пi}$ на час початку локалізації; $\tau_{в.г.i}$, $V_{Пв}$, $S_{лок.i}$, $\tau_{лок.i}$ і $\tau_{г.i}$, тип і кількість пожежних стволів для гасіння та захисту (окремо) $(N_B^{\Gamma})_{\partial.i}$, $(N_A)_{\partial.i}$, $(N_B^{\ni})_{\partial.i}$, l_{qi}, q_i, p_i; тип апарату для захисту органів дихання та зору; тип термозахисного одягу; тактичний варіант локалізації та гасіння пожежі.

Блок-схему алгоритму розв'язку оптимізаційної математичної моделі вибору оптимальної тактики гасіння пожеж у приміщеннях цехів деревообробних підприємств зображено на рис. 3-7. Для реалізації оптимізаційної моделі розроблено для ПЕОМ на підставі наведеного алгоритму пакет прикладних програм на мові C^{++} для роботи в середовищі Windows XP. Час роботи ПЕОМ становив 5-7 с для 5 тис. випробувань (N − циклів) за імовірності потрапляння досліджуваної i-тої точки в область допустимих розв'язків p_i = 0,94-0,96.

Для пояснення роботи програми розглянемо конкретний приклад її реалізації в ручному режимі.

Приклад. Розглянемо кілька циклів роботи ПЕОМ на прикладі вибору оптимальної тактики гасіння пожежі на кварталі складу круглих лісоматеріалів. Основні параметри кварталу складу: штабелі розміром $b \times l \times h$ = 6×6,5×6 м; ширина поздовжніх розривів між штабелями b_n = 16 м; ширина поперечних розривів між штабелями b_{non} = 6 м; загальна кількість поздовжніх рядів кварталу 5 сумарною шириною $B_к$ = 94 м; загальна кількість поперечних рядів 18 сумарною довжиною $L_к$ = 219 м; загальна площа кварталу 20586 м^2. Пожежа виникла в ситуації 2(94; 219) (див. рис. 2). *В*икористовуючи блок-схему алгоритму (див. рис. 3), вводимо в блок 1 вхідні дані.

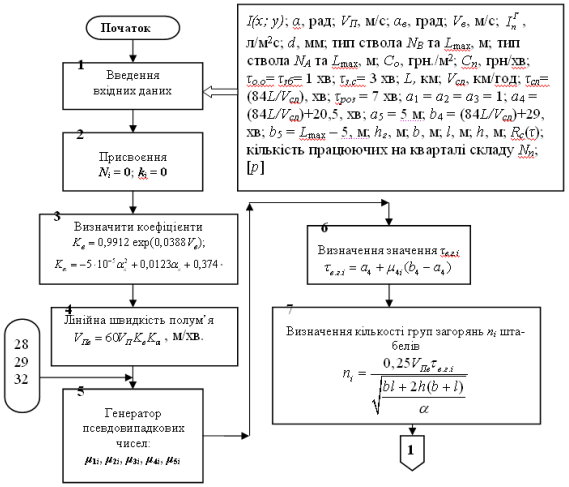

Рис. 3. Блок-схема алгоритму для введення вхідних даних, генерації псевдовипадкових чисел, визначення значення чинника обмеження (31) та визначення кількості груп загорянь штабелів

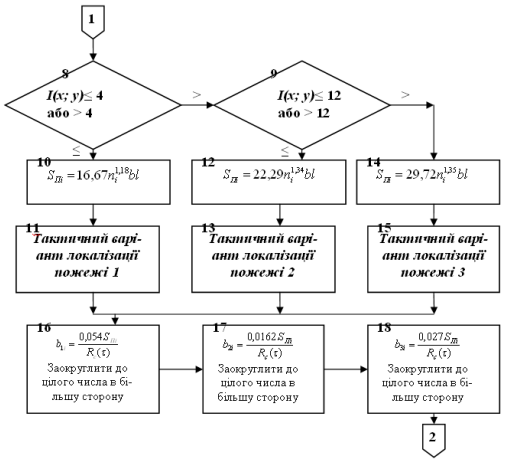

Рис. 4. Блок-схема алгоритму для розрахунку площі пожежі, вибору тактичного варіанта локалізації пожежі та обмежень

І цикл (початок розрахунку)

Блок 1. *В*ведення вхідних даних: 2(94; 219); α = 0,785 рад; $V_П$ = 0,0585 м/с; $\alpha_в$ = 270 º; $V_в$ = 4 м/с; $I_n^Г$ = 0,2 л/м^2 с; d = 16 мм; тип ствола *В* РСП-50 L_{max}= 30 м; тип ствола А РСП-70 L_{max}= 30 м; C_o = 2200 грн/м^2; C_n = 67 грн/хв; $\tau_{о.о}$= $\tau_{зб}$= 1 хв; $\tau_{з.с}$= 3 хв; L = 2 км; $V_{сл}$ = 32 км/год; $\tau_{сл}$= 5,25 хв; $\tau_{роз}$ = 7 хв; $a_1 = a_2 = a_3$ = 1; a_4 = 25,75, хв; a_5 = 5 м; b_4 = 34,25 хв; b_5 = 25 м; $h_г$ = 5 м; b = 6 м; l = 6,5 м; h = 6 м; $R_c(\tau)$ = 0,84; N_N = 12; **[**p**]** = 0,5.

Блок 2. Присвоєння $N_i = 0$; $K_i = 0$.

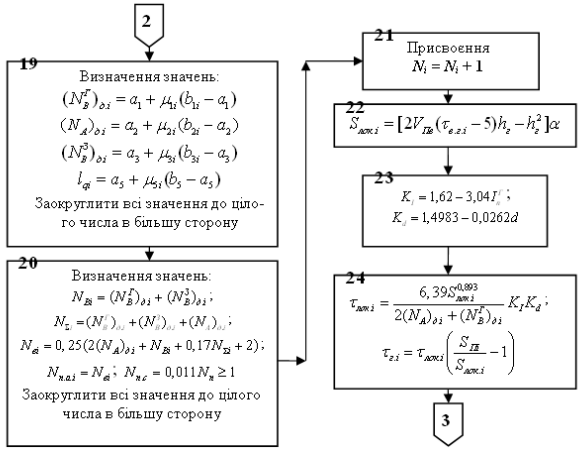

Рис. 5. Блок-схема алгоритму для визначення кількості пожежних стволів, відділень, пожежних автомобілів та часу локалізації та гасіння пожежі

Блок 3. $K_в = 0{,}9912\exp(0{,}0388\cdot4) = 1{,}16$; $K_\alpha = -5\cdot10^{-5}\cdot270^2 + 0{,}0123\cdot270 + 0{,}374 = 0{,}05$.

Блок 4. $V_{Пв} = 60\cdot0{,}0585\cdot1{,}16\cdot0{,}05 = 0{,}204$м/хв.

Блок 5. Генератор псевдовипадкових чисел: μ_{11} = 0,1; μ_{21} = 0,12; μ_{31} = 0,11; μ_{41} = 0,6; μ_{51} = 0,2.

Блок 6. $\tau_{в.г.1} = 25{,}75 + 0{,}6(34{,}25 - 25{,}75) = 30{,}85$ хв.

Блок 7. $n_1 = \frac{0{,}25\cdot0{,}204\cdot30{,}85}{\sqrt{\frac{6\cdot6{,}5 + 2\cdot6(6+6{,}5)}{0{,}785}}} = 0{,}1.$

Для продовження роботи першого циклу використовуємо блок-схему алгоритму, яку зображено на рис. 4.

Блок 8. 2(94; 219) < 4; на підставі цього результату переходимо до блоку 10.

Блок 10. $S_{П1} = 16{,}67\cdot0{,}17^{1{,}18}6\cdot6{,}5 = 42{,}95$ м^2.

Блок 11. **Тактичний варіант локалізації пожежі 1.**

Блок 16. $b_{11} = \frac{0{,}054\cdot42{,}95}{0{,}84} = 2{,}76$; приймаємо b_{11} = 3.

Блок 17. $b_{21} = \frac{0{,}0162\cdot42{,}95}{0{,}84} = 0{,}83$; приймаємо b_{21} = 1.

Блок 18. $b_{31} = \frac{0{,}027\cdot42{,}95}{0{,}84} = 1{,}38$; приймаємо b_{31} = 2.

Для продовження роботи першого циклу використовуємо блок-схему алгоритму, яку зображено на рис. 5.

Блок 19. $(N_B^Г)_{\partial.1}$=1+0,1(3-1)=1,2; приймаємо $(N_B^Г)_{\partial.1}$=2; $(N_A)_{\partial.1}$=1+ 0,12(1-1)=1; $(N_B^Ш)_{\partial.1}$= 1+0,11(2-1)= 1,11; приймаємо $(N_B^Ш)_{\partial.1}$= 2; l_{q1}= 5+0,2(25-5)= 9 м.

Блок 20. N_{B1} = 2 + 2 = 4; $N_{\Sigma1}$ = 2 + 1 + 2 = 5; $N_{в.1}$ = 0,25(2·1 + 4 + 0,17·5 + 2) = 2,21; приймаємо $N_{в.1}$ = 3; $N_{п.а.1}$ = 3; $N_{п.с}$ = 0,011·12 = 0,132; приймаємо $N_{п.с}$ = 1.

Блок 21. Присвоєння $N_1 = 0 + 1 = 1$.

Блок 22. $S_{лок.1} = [2 \cdot 0{,}204(30{,}85\text{-}5)5\text{-}5^2]0{,}785 = 21{,}8$ м^2.

Блок 23. $K_I = 1{,}62\text{-}3{,}04 \cdot 0{,}2 = 1{,}012$; $K_d = 1{,}4983\text{-}0{,}0262 \cdot 16 = 1{,}079$.

Блок 24. $\tau_{лок.1} = \dfrac{6{,}39 \cdot 21{,}8^{0{,}893}}{2 \cdot 1 + 2} 1{,}012 \cdot 1{,}079 = 27{,}35$ хв; $\tau_{г.1} =$ 27,35(42,95: :21,8–1)=26,53 хв.

Для продовження роботи першого циклу використовуємо блок-схему алгоритму, яку зображено на рис. 6.

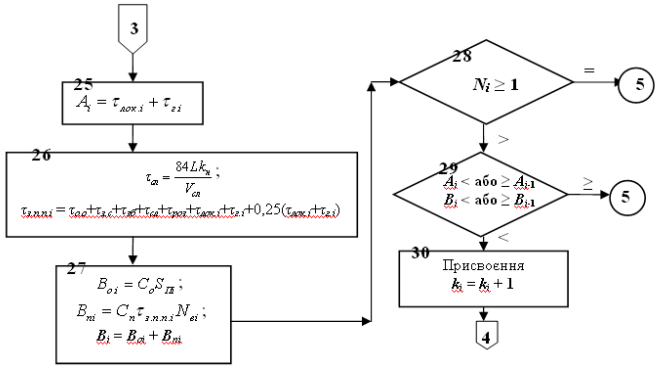

Рис. 6. Блок-схема алгоритму для визначення збитків і витрат, які пов'язані з пожежею

Блок 25. $A_1 = 27{,}35 + 26{,}53 = 53{,}88$ хв.

Блок 26. $\tau_{сл} = \dfrac{84 \cdot 2 \cdot 1{,}4}{32} = 7{,}35$ хв; $\tau_{з.п.п.1} =$ 1+3+1+7,35+7+27,35+26,53+ 0,25(27,35 +26,53) = 86,7 хв;

Блок 27. $B_{o1} = 2200 \cdot 42{,}95 = 94490$ грн; $B_{п1} = 67 \cdot 86{,}7 \cdot 3 = 17426{,}7$ грн; $B_1 =$ 94490 + 17426,7 = 111916,7 грн.

Блок 28. $N_1 = 1$, що необхідно повернутися на блок 5 і розпочати *II* цикл.

II цикл

Блок 5. Генератор псевдовипадкових чисел: $\mu_{12} = 0{,}6$; $\mu_{22} = 0{,}62$; $\mu_{32} =$ 0,81; $\mu_{42} = 0{,}1$; $\mu_{52} = 0{,}95$.

Блок 6. $\tau_{в.г.2} = 25{,}75 + 0{,}1(34{,}25 - 25{,}75) = 26{,}6$ хв.

Блок 7. $n_2 = \dfrac{0{,}25 \cdot 0{,}204 \cdot 26{,}6}{\sqrt{\dfrac{6 \cdot 6{,}5 + 2 \cdot 6(6 + 6{,}5)}{0{,}785}}} = 0{,}087.$

Блок 8. 2(94; 219) < 4; на підставі цього результату переходимо до блоку 10.

Блок 10. $S_{П2} = 16{,}67 \cdot 0{,}087^{1{,}18} 6 \cdot 6{,}5 = 36{,}66$ м^2.

Блок 11. **Тактичний варіант локалізації пожежі 1.**

Блок 16. $b_{12} = \dfrac{0{,}054 \cdot 36{,}66}{0{,}84} = 2{,}36$; приймаємо $b_{12} = 3$.

Блок 17. $b_{22} = \dfrac{0{,}0162 \cdot 36{,}66}{0{,}84} = 0{,}71$; приймаємо $b_{22} = 1$.

Блок 18. $b_{32} = \dfrac{0{,}027 \cdot 36{,}66}{0{,}84} = 1{,}18$; приймаємо $b_{32} = 2$.

Блок 19. $(N_B^{\Gamma})_{д.2}$= 1+0,6(3-1)= 2,2; приймаємо $(N_B^{\Gamma})_{д.2}$= 3; $(N_A)_{д.1}$= 1+0,62(1-1)= 1; $(N_B^{2})_{д.2}$= 1+0,81(2-1)= 1,81; приймаємо $(N_B^{2})_{д.2}$= 2; l_{q2}= 5+0,95(25-5)= 24 м.

Блок 20. $N_{B2} = 3 + 2 = 5$; $N_{\Sigma 2} = 3 + 1 + 2 = 6$; $N_{в.2} = 0{,}25(2 \cdot 1 + 5 + 0{,}17 \cdot 6 + 2) = 2{,}26$; приймаємо $N_{в.3} = 3$; $N_{п.а.1} = 3$; $N_{п.с} = 0{,}011 \cdot 12 = 0{,}132$; приймаємо $N_{п.с} = 1$.

Блок 21. Присвоєння $N_2 = 1 + 1 = 2$.

Блок 22. $S_{лок.2} = [2 \cdot 0{,}204(26{,}6\text{-}5)5\text{-}5^2]0{,}785 = 14{,}96$ м^2.

Блок 23. $K_I = 1{,}62\text{-}3{,}04 \cdot 0{,}2 = 1{,}012$; $K_d = 1{,}4983\text{-}0{,}0262 \cdot 16 = 1{,}079$.

Блок 24. $\tau_{лок.2} = 6{,}39 \cdot 14{,}96^{0{,}893}$:(2·1+3)·1,012·1,079=15,63хв; $\tau_{г.2} =$ =15,63×(36,66/14,96-1)=22,67 хв.

Блок 25. $A_2 = 15{,}63 + 22{,}67 = 38{,}3$ хв.

Блок 26. $\tau_{сл} = (84 \cdot 2 \cdot 1{,}4):32 = 7{,}35$ хв; $\tau_{з.п.п.2}$ = 1+3+1+7,35+7+15,63+ +22,67+0,25(15,63 +22,67) = 67,23 хв;

Блок 27. $B_{o2} = 2200 \cdot 36{,}66 = 80652$ грн; $B_{п2} = 67 \cdot 67{,}23 \cdot 3 = 13513{,}23$ грн; B_2 = 80652 + 13513,23 = 94165,23 грн.

Блок 28. $N_2 = 1 + 1 = 2 > 1$, що дає змогу блоку 29.

Блок 29. $A_2 = 38{,}3 < A_1 = 53{,}88$; $B_2 = 94165{,}23 < B_1 = 111916{,}7$.

Блок 30. Присвоєння $K_1 = 0 + 1 = 1$.

Для закінчення розгляду другого циклу роботи програми скористуємося продовженням блок-схеми алгоритму, яку зображено на рис. 7.

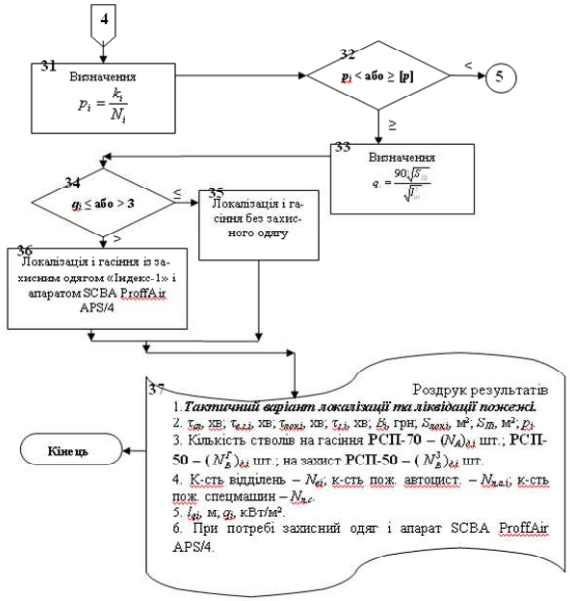

Рис. 7. Блок-схема алгоритму розв'язку оптимізаційної математичної моделі вибору оптимальної тактики гасіння пожеж на лісоскладах штабельного зберігання (закінчення)

Блок 31. *В*изначення $p_1 = \frac{k_1}{N_2} = \frac{1}{2} = 0,5$.

Блок 32. $p_1 = [p] = 0,5$.

Блок 33. $q_2 = \frac{90\sqrt[3]{36,66}}{\sqrt{24^3}} = 2,54$ кВт/м^2.

Блок 34. $q_2 = 2,54 < 3$.

Блок 35. Локалізація і гасіння без захисного одягу.

Блок 37. Роздрук результатів.

1. Тактичний варіант 1.

2. $\tau_{сл}$ =7,35 хв, $\tau_{в.г.}$ =26,6 хв, $\tau_{лок}$ = 15,63 хв, $\tau_г$ = 22,67 хв, B = 94165,23 грн, $S_{лок}$ = 14,96 м^2, $S_П$ = 36,66 м^2, p = 0,5.

3. *С*тволи на гасіння РСП-70-1 шт., РСП-50-3 шт.; на захист РСП-50-2 шт.

4. Кількість відділень – 3; кількість пожежних автоцистерн – 3; кількість пожежних спецмашин – 1.

5. l_q = 24 м; q = 2,54 к*В*т/м^2.

У розглянутому прикладі для отримання значень виконано тільки два цикли розрахунку. Безумовно, що отримані значення не є оптимальними. Це пояснюється тим, що для прикладу взято **[p]** = 0,5. При вирішенні цього завдання на комп'ютері значення **[p]** приймається в межах 0,95-0,98, що вимагає проведення в багатьох випадках 5-10 тис. циклів.

Висновки:

1. Розроблено математичну модель, блок-схему алгоритму та пакет прикладних програм для вибору оптимального варіанта тактики локалізації та гасіння пожеж на складах лісоматеріалів деревообробних підприємств.
2. Розроблена математична модель дає змогу оперативно та обгрунтовано з імовірністю 0,94-0,96 визначати оптимальний варіант тактики і тривалості локалізації та гасіння пожежі з визначенням необхідних при цьому кількості сил і засобів, а також необхідного для пожежних, за певних умов ліквідації пожежі, газодимозахисного спорядження і термозахисного одягу.
3. Упровадження в пожежно-рятувальних підрозділах Державної служби надзвичайних ситуацій математичної моделі оптимізації тактики локалізації та гасіння пожеж на лісоскладах деревообробних підприємств дає змогу, як показали попередні розрахунки, зменшити тривалість ліквідації пожежі на 32 % і відповідно зменшити збитки від пожежі на 21 %.
4. Необхідна подальша робота з метою удосконалення оптимізаційної моделі з урахуванням впровадження в пожежну практику новітніх тактичних прийомів ліквідації пожеж на лісоскладах деревообробних підприємств з використанням удосконаленого пожежного спорядження та засобів вогнегасіння і вогнезахисту підвищеної ефективності.

Література

1. Курбатский О.М. Результаты исследования тушения пожаров лесобирж / О.М. Курбатский // Вопросы пожаротушения и пожарной профилактики : сб. науч. тр. – М. : Изд-во ВНИИПО, 1959. – С. 41-52.

2. Курбатский О.М. Тушение пожаров на складах лесопиломатериалов / О.М. Курбатский, И.И. Петров // Успехи пожарной науки и техники : сб. науч. тр. – М. : Изд-во "Стройиздат", 1967. – С. 60-66.

3. Копылов Н.П. О влиянии ветра на величину тепловых потоков от пламени открытого пожара / Н.П. Копылов, Г.М. Гроздов // Пожарная профилактика : сб. науч. тр. – М. : Изд-во ВНИИПО. – 1980. – Вып. 16. – С. 68-73.

4. Иванников В.П. Справочник руководителя тушения пожара / В.П. Иванников, П.П. Клюс. – М. : Изд-во "Стройиздат", 1987. – 288 с.

5. Кудин А.И. Обзор критериев принятия решения для целей создания оперативного плана тушения пожаров в резервуарных парках / А.И. Кудин, В.И. Пермяков // Тезисы докладов 51-й НТК. – Харьков : Изд-во ХГТУСА, 1996. – С. 73.

6. Кудин А.И. Организация базы знаний для экспертной системы принятия решения при тушении пожаров с нефтепродуктами / А.И. Кудин, В.И. Пермяков // Проблеми пожежної безпеки : зб. наук. праць. – К. : Вид-во МВС України, 1995. – С. 244-245.

7. Абрамов Ю.А. Предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций в резервуарных парках с нефтепродуктами / Ю.А. Абрамов, А.Е. Басманов. – Харьков : Изд-во АГЗУ, 2006. – 251 с.

8. Абрамов Ю.А. Алгоритм оптимального расположения сил и средств для тушения пожара в резервуарном парке / Ю.А. Абрамов, А.Е. Басманов // Проблеми надзвичайних ситуацій : зб. наук. праць АЦЗ України. – Харків : Вид-во "Фоліо". – 2006. – Вип. 3. – С. 26-32.

9. СНиП 21-03-2003. Склады лесных материалов. Противопожарные нормы РФ. – М. : Изд-во "Пожарный Центр", 2003. – 18 с.

10. ГОСТ 2292-88. Лесоматериалы круглые. – М. : Изд-во "ИПК стандартов", 2003. – 9 с.

11. Hulida E. Mathematical model of the optimization of fire extinguishing time length in the woodworking enterprises' workshops / E. Hulida, O. Koval // Econtechmod. – Lublin; Rzeszow. – 2015. – Vol. 4, № 1. – Pp. 39-43.

12. Климась Р. Статистика пожеж на деревообробних підприємствах за 2011 і 2012 роки / Р. Климась. – К. : Вид-во УкрНДІЦЗ, 2013. – 5 с.

13. Повзик Я.С. Пожарная тактика / Я.С. Повзик, П.П. Клюс, А.М. Матвейкин. – М. : Изд-во "Стройиздат", 1990. – 335 с.

14. Коваль О.М. Визначення критерію прийняття рішення для оптимізації процесів локалізації та гасіння пожеж на деревообробних підприємствах / О.М. Коваль // Науковий вісник НЛТУ України : зб. наук.-техн. праць. – Львів : РВВ НЛТУ України. – 2015. – Вип. 25.4. – С. 345-352.

15. Мовчан І.О. Вибір критеріїв для прийняття рішень в системі пожежогасіння / І.О. Мовчан, М.І. Васильєв // Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності : зб. наук. праць. – Львів : Вид-во ЛДУ БЖД. – 2013. – № 8. – С. 146-154.

16. Бут В.П. Практичний посібник з пожежної тактики / В.П. Бут, Л.Б. Куцій, Б.В. Болібрух. – Львів : Вид-во СПОЛОМ, 2003. – 133 с.

17. Нормативи по пожежно-стройовій підготовці. – К. : Вид-во УДПО МВС України, 1995. – 14 с.

18. Гулида Э.Н. Управление надежностью цилиндрических зубчатых колес / Э.Н. Гулида. – Львов : Изд-во "Вища шк."; Изд-во при Львов. ун-те, 1983. – 136 с.

Коваль А.М., Гулида Э.Н. **Математическая модель выбора оптимальной тактики тушения пожаров на складах лесоматериалов деревообрабатывающих предприятий**

Разработаны математическая модель, блок-схемы алгоритма и программа для оптимизации выбора тактики локализации и тушения пожаров на открытых складах лесоматериалов деревообрабатывающих предприятий. Модель включает все необходимые зависимости для установления оптимального времени локализации и тушения пожара с учетом влияния скорости и направления действия ветра, что приводит к изменению скорости распространения пламени пожара. Кроме этого, математическая модель позволяет обоснованно определять оптимальный вариант тактики и продолжительности локализации и тушения пожара с необходимым при этом количеством сил и средств, а также необходимыми для ликвидации пожара газодымозащитным снаряжением и термозащитной одеждой. Научная новизна заключается в том, что впервые с помощью оптимизационной математической модели рассмотрены и обоснованы основные положения тактических действий системы пожаротушения на открытых складах лесоматериалов деревообрабатывающих предприятий.

Ключевые слова: математическая модель, тактика локализации и тушения пожара, пожарный ствол, тепловая радиация.

Koval O.M., Hulida Ye.M. **Mathematical Model of Optimal Choice of Fire Fighting Tactics at Millyard Applications Woodworking Companies**

The mathematical model, flowchart and a program for optimizing the choice of tactics of containment and extinguishing fires on the open storage timber wood processing enterprises are designed. The model includes all of the dependencies for establishing the optimal time localization and extinguishing effect based on the velocity and direction of the wind, causing changes in the speed of flame propagation of the fire. In addition, the mathematical model can reasonably determine the optimal variant of tactics and duration localization and fire extinguishing with the necessary amount with the forces and resources, and the need for fire suppression protection from gas and smoke equipment and heat protection clothing. Scientific novelty lies in the fact that for the first time with the help of optimization mathematical model considered and justified basic provisions of tactical action fire suppression systems on open storage timber wood processing enterprises.

Keywords: mathematical model, the tactics of containment and extinguishing the fire barrel and thermal radiation.

УДК 681.3

Доц. Л.В. Мороз, д-р техн. наук; аспір. Т.Р. Борецький; доц. Ю.М. Костів, канд. техн. наук – НУ "Львівська політехніка"

СИНУС-КОСИНУСНИЙ FPGA-ОБЧИСЛЮВАЧ НА ОСНОВІ CORDIC-МЕТОДУ З ПЕРЕКОДУВАННЯМ КУТА

Наведено оптимізовані алгоритми обчислення функцій синуса-косинуса засобами програмованої логічної інтегральної схеми (ПЛІС), виявлено їх переваги та недоліки порівняно із класичними реалізаціями та отримано основні характеристики реалізованих методів. Використання методів оптимізації обчислень синуса та косинуса у засобах ПЛІС дають змогу покращити основні характеристики алгоритму в їхній апаратній реалізації порівняно з класичним методом, зокрема у вигляді мегафункції, за допомогою якої істотно зменшується кількість тактів, латентність, кількість необхідних блоків та збільшується мінімальна тактова частота.

Ключові слова: CORDIC, IP Core, ПЛІС, алгоритм, латентність, мегафункція.

Вступ. В цій роботі розглянуто практичну реалізацію алгоритмів обчислення синуса-косинуса та його синтез на платформі ПЛІС (FPGA). Імплементацію проведено для двох типів ПЛІС – від фірм Altera та Xillix.

Опис відомих методів. Основним недоліком класичного методу CORDIC **[**1, 2**]** є низька швидкодія через лінійну збіжність методу (один правильний біт результату за одну ітерацію) та відносна апаратна складність, пов'язана з необхідністю реалізації одночасно трьох ітераційних рівнянь (для x_i, y_i, z_i) у випадку застосування конвеєрної структури обчислювача:

$$\begin{aligned} x_i &= x_{i-1} - \sigma_i \cdot y_{i-1} \cdot 2^{-i}; \\ y_i &= y_{i-1} - \sigma_i \cdot x_{i-1} \cdot 2^{-i}; \\ z_i &= z_{i-1} - \sigma_i \cdot \arctan(2^{-i}); \\ \sigma_i &= sign(z_{i-1}), i = 1...m, \end{aligned} \quad (1)$$

де m – кількість двійкових розрядів обчислювача.

З метою спрощення апаратної реалізації обчислювача запропоновано метод CORDIC з перекодуванням вхідного кута **[**4-7**]**, що дає змогу звести систему (1) лише до двох ітераційних рівнянь (для x_i, y_i). Одночасно з цим для підвищення швидкодії методу (зменшення числа ітерацій) розроблено гібридні структури, що використовують послідовно три методи: табличний + CORDIC + кусково-лінійна апроксимація **[**3, 4, 8, 9**]**. Причому CORDIC виконано у різних варіантах – класичному **[**3**]**, з використанням ітераційних формул вищих порядків **[**8-10**]**, без перекодування та з перекодуванням вхідного кута **[**4**]**. Найпростішим з погляду апаратного втілення є CORDIC з перекодуванням вхідного кута **[**4**]**. Однак він має істотний недолік – великий об'єм пам'яті таблиці попередньої вибірки (ТПВ типу LUT) при великих значеннях m (необхідна таблиця розміром, не меншим, ніж $2^{m/3} \cdot m$ бітів). Окрім цього, вихідні помножувачі тут реалізовані у базисі {-1;1}, що унеможливлює використання помножувачів, які є у складі блоків DSP сучасних ПЛІС.

Слабким місцем методу класичного перекодування кута **[**4**]** була необхідність використання ТПВ великого об'єму. У статтях **[**12, 13**]** цей недолік було зведено до мінімуму, коли при розрядності 24-32 бітів мінімально можлива за об'ємом ТПВ вимагала аналізу лише 2-3 розрядів вхідного аргументу. Удосконалений алгоритм перекодування кута був реалізований на платформі FPGA CycloneIII мовою програмування SystemVerilog **[**11**]**.

Основними складностями у процесі реалізації алгоритмів цього методу були:

- реалізація арифметичних і логічних операцій зі змінними та масивами різного типу;
- необхідна наявність блоків помножувача з підтримкою знакового представлення аргументів;
- неможливість коректно виконувати дію множення знакових і беззнакових величин засобами мови Verilog **[**14**]**;
- необхідність зведення всіх представлених величин до одного формату;
- зменшення розрядності та точності обчислень через надлишковість формату.

Під час проектування та налаштування алгоритму виникали труднощі у зв'язку з наведеними вище обмеженнями. Усі ці труднощі можна усунути, використавши метод перекодування, описаний у роботі **[**12**]**.

Однак у **[**12**]** описано лише основи теорії методу, які потребують формалізації у вигляді алгоритмів, придатних для апаратного виконання на платформі FPGA. Саме це і є метою цієї роботи.

Опис пропонованого алгоритму для тригонометричних функцій синус-косинус. Пропонований алгоритм методу **[**12**]** здатний коректно функціонувати на проміжку

$$\varphi \in [0, \pi/2] \quad (2)$$

та використовувати при арифметичних операціях лише додатні величини. Розділимо вхідний кут ϕ на три кути

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3. \quad (3)$$

Кут φ_1 опрацьовуємо табличним методом (m_{LUT} – число старших бітів кута ϕ, що подаються на переглядову таблицю ТПВ), кут φ_2 – пропонованим Cordic-методом, кут φ_3 – за допомогою методу залишкового множення (кусково-лінійної апроксимації), причому: