

### 3. ТЕХНОЛОГІЯ ТА УСТАТКУВАННЯ ЛІСОВИРОБНИЧОГО КОМПЛЕКСУ

УДК 66.047 Проф. В.М. Атаманюк, д-р техн. наук; доц. Д.П. Кіндзера,  
канд. техн. наук; магістр Р.Р. Госовський – НУ "Львівська політехніка"

#### РОЗРАХУНОК КОЕФІЦІЄНТА ГІДРАВЛІЧНОГО ОПОРУ ПІД ЧАС РУХУ ТЕПЛОВОГО АГЕНТА КРІЗЬ СТАЦІОНАРНИЙ ШАР ПОДРІБНЕНИХ СТЕБЕЛ СОНЯШНИКА

Наведено результати розрахунку коефіцієнта гідравлічного опору, на основі рівнянь Дарсі-Вейсбаха, під час руху теплового агента крізь шар подрібнених стебел соняшника. Також проведено аналіз максимального значення відносної похибки між розрахованими теоретично значеннями втрат тиску  $\Delta P_m$  та експериментальними  $\Delta P_e$ , що не перевищує 20 %. Обґрунтовано доцільність використання відходів сільськогосподарства, зокрема стебел соняшника, для виготовлення паливних брикетів.

**Ключові слова:** подрібнені стебла соняшника, альтернативні джерела енергії, біомаса, полідисперсна суміш, гідродинаміка, коефіцієнт гідравлічного опору.

Світова тенденція до зростання цін на традиційні носії енергії привела до активного пошуку альтернативних джерел енергії та формування біоенергетичних ринків, продуктами яких є рідкі, тверді та газоподібні палива, отримані з відходів сільськогосподарства [1-4]. Потенціал біомаси України, сформований із залишків соняшника (стебла, листя, кошики, лушпиння), є значним. Лушпиння, загальний об'єм якого в Україні сягає 675 тис. т/рік [5], вже активно використовують для виробництва твердого біопалива. Зважаючи на високу середню теплотворну здатність стебел соняшника 12,5 МДж/кг [6], одним із перспективних методів їх використання є виробництво твердого палива з такого виду сировини, що сприятиме переходу сільськогосподарських господарств і заводів-олієвиробників на власні енергоресурси.

**Постановка проблеми.** Технологія виготовлення твердого палива з рослинної сировини передбачає висушування сировини до вологості 6-12 %, тому технологічні лінії оснащують різними сушарками: барабанными, стрічковими та киплячого шару. Тому частка затрат на підготування сировини – подрібнення та сушіння – в собівартості брикетів є значною. Окрім цього, сушарки є громіздкими, енергоємними, потребують встановлення обладнання для очищення теплового агента від твердих частин. З огляду на це, дослідження можливостей зменшення енергетичних витрат на стадії сушіння біомаси соняшника, яка є сировиною для виготовлення твердого біопалива, є актуальними. Одним із варіантів зменшення енергетичних затрат на процес сушіння є заміна існуючого сушильного обладнання на сушарки фільтраційного типу.

Важливим етапом вивчення процесу сушіння подрібнених стебел соняшника за вибраним методом є дослідження закономірностей зміни гідрав-

лічного опору шару сухого матеріалу від фіктивної швидкості руху теплового агента, оскільки дають змогу прогнозувати питомі енергозатрати на створення перепаду тисків для забезпечення необхідної швидкості руху теплового агента крізь пористу структуру стаціонарного шару матеріалу.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Для опису гідродинаміки руху газового потоку крізь стаціонарний пористий шар матеріалу на практиці використовують залежність Дарсі-Вейсбаха [7-11]:

$$\Delta P = \lambda \cdot \frac{H}{d_e} \cdot \frac{\rho \cdot v_0^2}{2 \cdot \varepsilon_{ii}}, \quad (1)$$

де:  $\lambda$  – коефіцієнт опору шару;  $H$  – висота шару, м;  $d_e$  – еквівалентний діаметр, м;  $\rho$  – густина газового потоку, кг/м<sup>3</sup>;  $v_0$  – фіктивна швидкість руху середовища, м/с,  $\varepsilon_{ii}$  – пористість шару матеріалу.

Для визначення коефіцієнта опору в технічній літературі пропонують велику кількість розрахункових залежностей, які отримано шляхом узагальнення експериментальних результатів для різних за розмірами і формою дисперсних матеріалів та режимів фільтрування газового потоку. Загалом коефіцієнт тертя  $\lambda$  можна представити як функцію числа Рейнольдса [12]:

$$\lambda = \frac{A}{Re} + B, \quad (2)$$

де "А" та "В" – невідомі коефіцієнти, які визначають експериментальним шляхом.

Одним із способів розрахунку гідравлічного опору в шарі дисперсного матеріалу під час руху теплового агента крізь нього є приведення залежності

(1) до модифікованого рівняння Ергана  $\frac{\Delta P}{H \cdot v_0} = A \cdot \frac{\mu \cdot a^2}{32 \cdot \varepsilon^3} + B \cdot \frac{\rho \cdot a}{8 \cdot \varepsilon^3} \cdot v_0$  і пред-

ставлення результатів досліджень у вигляді залежності  $\Delta P / (H \cdot v_0) = f(v_0)$ . За відрізком, який відтинає пряма на осі ординат, визначають невідомий коефіцієнт "А", що враховує вплив в'язких сил, та коефіцієнт "В" – за тангенсом кута нахилу кривої до осі абсцис і який враховує вплив інерційних сил. Отримані таким чином розрахункові залежності наведено в роботах [7-11]. Ці залежності є справедливими для конкретних матеріалів, у разі дотримання аналогічних геометричних характеристик апаратів, у межах зазначених швидкостей руху теплового агента, однак коефіцієнт гідравлічного опору в них виражений в неявній формі, тому їх використання є обмеженим.

У технічній літературі [12] залежність (2) з врахуванням коефіцієнтів "А" та "В" представляють у вигляді:

$$\lambda = \frac{133}{Re} + 2,34. \quad (3)$$

Залежність (3) є справедливою для визначення коефіцієнта гідравлічного опору під час руху теплового агента (в межах трьох режимів) крізь шари дисперсних матеріалів, які складаються з частинок правильної форми. Однак вона не дає достатньої точності для визначення коефіцієнта гідравлічного

опору рухові теплового агента крізь шари полідисперсних матеріалів, які складаються з частинок неправильної форми, мають складну структуру шару, характеризується різним ступенем перекриття поверхні частинок, які омиваються тепловим агентом.

Оскільки єдиної методики щодо визначення чинника форми частинок і ступеня перекриття поверхні у полідисперсних матеріалах не існує, то використання залежності (3) для зазначених випадків є неможливим через велику похибку між теоретично розрахованими й експериментальними значеннями.

Для визначення коефіцієнта гідравлічного опору в шарах, сформованих із частинок циліндричної форми, автори [13] пропонують використовувати залежність

$$\lambda = \frac{A}{Re^x} \quad (4)$$

Однак, виходячи з форми запису залежності, можна зробити висновок, що вона є справедливою в межах руху теплового агента в ламінарному режимі та не дає достатньої точності в автономній області та під час турбулентного руху останнього.

Як стверджують автори робіт [7-11], універсальних розрахункових залежностей, які можна було б використовувати для будь-яких полідисперсних матеріалів, не існує, тому для кожного дисперсного матеріалу необхідно експериментально визначити невідомі коефіцієнти рівнянь (2) або (4).

Існують залежності для визначення коефіцієнтів опору, отримані шляхом застосування критеріальних рівнянь, для шарів "енергетичної" верби [14], шлаку, глини та сирцевих гранул [15, 16], гранульованого крупнопористого силікагелю [17], які характеризуються високою точністю для зазначених матеріалів. Однак для подрібнених стебел соняшника ці залежності використати неможливо через велику відмінність форми і розмірів частинок.

Коефіцієнт гідравлічного опору  $\lambda$  можна визначити інакшим чином, беручи за основу залежність (1) і виразивши складову  $\frac{\Delta P \cdot \varepsilon_w^2}{\rho \cdot v_0^2}$  як критерій Ейлера:

$$\frac{\Delta P \cdot \varepsilon_w^2 \cdot d_e}{\rho \cdot v_0^2 \cdot H} = Eu \cdot \frac{d_e}{H} = \frac{\lambda}{2} = f(Re), \quad (5)$$

звідки 
$$\lambda = 2 \cdot \frac{d_e}{H} \cdot Eu = f(Re) \quad (6)$$

На основі проведеного аналізу джерел літератури можна зробити висновок, що залежностей для визначення коефіцієнта гідравлічного опору рухові теплового агента крізь шар дисперсного матеріалу, який був би аналогічним шарові, сформованого з подрібнених стебел соняшника за гранулометричним складом, формою та структурою частин, не існує, тому дослідження гідродинаміки стаціонарного шару подрібнених стебел соняшника є актуальним.

**Метою роботи** є визначення коефіцієнта гідравлічного опору  $\lambda$ , що дасть змогу використовувати відому залежність Дарсі-Вейсбаха для прогно-

зування енергетичних затрат на процес фільтраційного сушіння подрібнених стебел соняшника в широких межах режимів руху теплового агента.

**Результати досліджень.** Подрібнені стебла соняшника – це полідисперсна суміш частинок капілярно-пористої структури, гранулометричний склад якої представлений "малими" фракціями від 0...0,16 до 0,63...1,25, які становлять 58,3 %, та "великими" фракціями від 1,25...2,5 до >5,0, які становлять 41,7 %. Розміри частинок визначали за допомогою мікроскопу МБЧ-11. "Кулястими" вважали частинки, у яких  $L/d < 2$ , "подовгастими" –  $L/d \geq 2$ . Встановлено, що у "великих" фракціях частинки мають лише кулясту форму, в "малих" фракціях – 20 % частинок мають кулясту форму та 80 % – подовгасту.

Результати експериментальних досліджень втрат тиску як функції фіктивної швидкості для подрібнених стебел соняшника наведено на рис. 1. Гідравлічний опір подрібненого матеріалу залежить від структурної будови шару (під час досліджень за відповідних перепадів тиску структура шару змінювалась незначно), будови частинок (наявність газопроникних пор і каналів), їх форми, висоти шару, а також від швидкості фільтрування теплового агента та його параметрів (густини, в'язкості).

На рис. 2 експериментальні дані представлено в безрозмірній формі у вигляді графічної залежності числа Ейлера від числа Рейнольдса для подрібнених стебел соняшника. Графічна залежність (рис. 2) дає змогу прогнозувати втрати тиску за відомих режимів руху теплового агента крізь стаціонарний шар подрібнених стебел соняшника різної висоти, що є зручним для інженерних розрахунків промислового обладнання, за відомих параметрів лабораторного устаткування, використовуючи масштабні коефіцієнти.

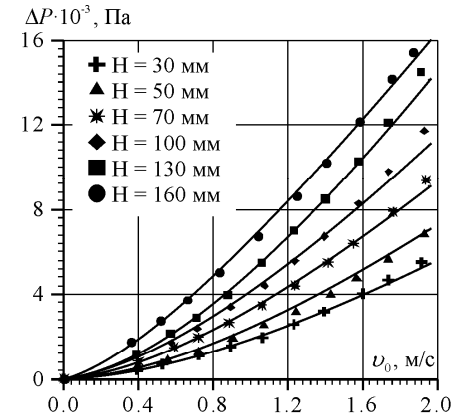


Рис. 1. Залежність втрат тиску в стаціонарному шарі подрібнених стебел соняшника від фіктивної швидкості руху теплового агента

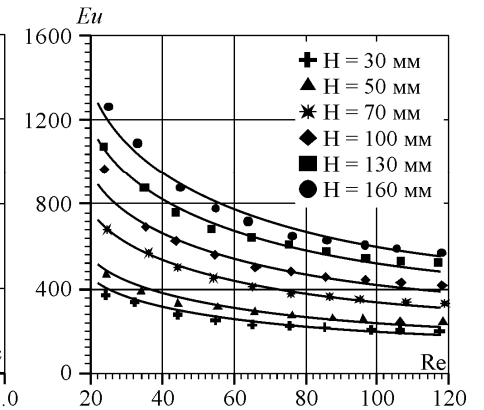


Рис. 2. Залежність числа Ейлера від числа Рейнольдса для подрібнених стебел соняшника

Для визначення коефіцієнта гідравлічного опору  $\lambda$  експериментальні дані, наведені на рис. 1, представимо у вигляді функціональної залежності  $\lambda = f(Re)$  (рис. 3). Апроксимація результатів експериментальних досліджень

степеневу функцією (рис. 3) дала змогу представити коефіцієнт гідравлічного опору у вигляді:

$$\lambda = \frac{30}{Re_e^{0,7}} + 1. \quad (7)$$

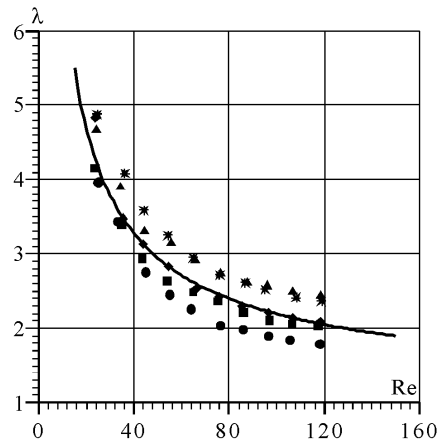


Рис. 3. Залежність коефіцієнта гідравлічного опору від числа Рейнольдса для подрібнених стебел соняшника (позначення відповідають рис. 1)

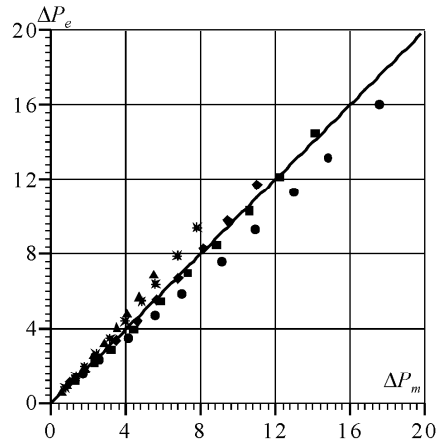


Рис. 4. Кореляційна залежність між теоретично розрахованими значеннями втрат тиску  $\Delta P_m$  та експериментальними значеннями втрат тиску  $\Delta P_e$

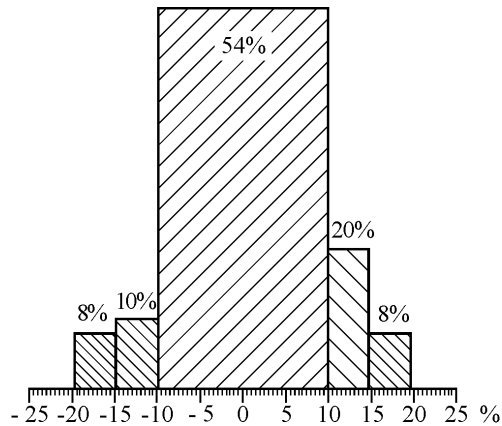


Рис. 5. Гістограма відхилення експериментальних даних від теоретично розрахованих

На рис. 4 наведено кореляційну залежність між теоретично розрахованими значеннями втрат тиску  $\Delta P_m$  згідно зі залежністю (1) з урахуванням залежності (7). Однак з аналізу рис. 4 видно збіг між експериментальними і теоретичними значеннями втрат тиску, що дає змогу зробити висновок про можливість використання отриманих залежностей для проектних розрахунків су-

шильного обладнання, щоб порівняти відхилення між експериментальними даними і теоретично розрахованими значеннями на основі залежності (1) та (2).

На рис. 5 наведено гістограму відхилень між експериментальними даними й теоретично розрахованими значеннями із залежності (1) і (2). З аналізу гістограми видно, що основна частина розрахованих значень не перевищує 10-15 %, що є цілком прийнятним для практичних розрахунків обладнання з метою фільтраційного сушіння. Значення похибки понад 20 % пояснюють складністю форми частинок і стихійністю формування шару.

**Висновки.** Визначений коефіцієнт гідравлічного тертя  $\lambda$  дає змогу прогнозувати енергетичні затрати на процес фільтраційного сушіння у широких межах режимів фільтрування теплового агента ( $20 \leq Re \leq 140$ ) з достатньою для проектних розрахунків точністю. Максимальне значення відносної похибки між теоретично розрахованими значеннями втрат тиску  $\Delta P_m$  (згідно із залежністю (1)) та експериментальними  $\Delta P_e$  не перевищує 20 %, що пояснюють складною формою окремих частинок і стихійністю формування шару.

### Література

1. Зінчук Т.О. Еколого-економічні аспекти розвитку біоенергетики в ЄС: Нові тенденції та перспективи для України / Т.О. Зінчук // Вісник ДАУ : зб. наук. праць. – 2007. – № 1. – С. 233-245.
2. Макарчук О.Г. Ефективність використання біоенергетичного потенціалу сільськогосподарських підприємств : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. екон. наук: спец. 08.00.04 – "Економіка та управління підприємствами (за видами економічної діяльності)" / О.Г. Макарчук. – К., 2010. – 20 с.
3. Гелетуша Г.Г. Государственное регулирование развития биоэнергетики в странах Европы и США / Г.Г. Гелетуша, Т.А. Железная // Промышленная теплотехника. – 2002. – № 4. – С. 81-88.
4. Самилін О.О. Перспективи використання біомаси як палива / О.О. Самилін, Н.М. Цивенкова, А.А. Голубенко // Вісник ДАУ : зб. наук. праць. – 2007. – № 1. – С. 171-177.
5. Железна Т. Лушпиння соняшнику для теплових потреб / Т. Железна, О. Морозова // Зелена енергетика. – 2007. – № 4. – С. 24-25.
6. Новітні технології біоенергоконверсії : монографія / Я.Б. Блюм, Г.Г. Плетуха, І.П. Григорюк, В.О. Дубровін, А.І. Ємець, Г.М. Забарний та інші. – К. : Вид-во "Аграр Медіа Груп", 2010. – 326 с.
7. Кіндзера Д.П. Гідродинаміка фільтраційного сушіння торфу / Д.П. Кіндзера, Я.М. Ханник, В.М. Атаманюк // Вісник Державного університету "Львівська політехніка". – Сер.: Хімія, технологія речовин і їх застосування. – Львів : Вид-во ДУ "Львівська політехніка". – 2001. – № 426. – С. 204-208.
8. Гузьова І.О. Гідродинаміка фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів / І.О. Гузьова, Я.М. Ханник // Вісник Державного університету "Львівська політехніка". – Сер.: Хімія, технологія речовин і їх застосування. – Львів : Вид-во ДУ "Львівська політехніка". – 2000. – № 414. – С. 168-172.
9. Аль-Ашкар Ясер. Фільтраційне сушіння дисперсних матеріалів в щільному шарі при ПЧ-нагріванні : дис. ... канд. техн. наук / Ясер Аль-Ашкар. – Львів, 1997. – 146 с.
10. Кіндзера Д.П. Сушіння паливних матеріалів різнодисперсного складу у щільному шарі : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук. – Львів, 2003. – 20 с.
11. Гузьова І.О. Гідродинаміка і тепломасообмін під час фільтраційного сушіння матеріалів кристалічної та аморфної структури : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук. – Львів, 2002. – 20 с.
12. Гельперин Н.И. Основные процессы и аппараты химической технологии. – В 2-ух книгах / Н.И. Гельперин. – М. : Изд-во "Химия", 1981. – 812 с.
13. Аэров М.Э. Аппараты со стационарным зернистым флюем / М.Э. Аэров, О.М. Годес, Д.А. Наринский. – Л. : Изд-во "Химия", 1979. – 176 с.

14. Мосюк М.І. Гідродинаміка стаціонарного шару подрібненої "енергетичної" верби під час фільтраційного сушіння / М.І. Мосюк, В.М. Атаманюк, Д.П. Кіндзера // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. – Одеса : Одеська національна академія харчових технологій. – 2011. – Вип. 40, т. 1. – 274. – С. 197-202 с.

15. Атаманюк В.М. Гідродинаміка стаціонарного шару технічного вуглецю // В.М. Атаманюк, Я.М. Гумницький // Восточно-Европейский журнал передовых технологий/ – Харків. – 2009. – Вип. 5/5 (41). – С. 29-34.

16. Атаманюк В.М. Гідродинаміка стаціонарного шару полідисперсного матеріалу під час фільтраційного сушіння. / В.М. Атаманюк, І.Р. Барна, Р.В. Ходорівський, М.П. Пелех // Науковий вісник НЛТУ України : зб. наук.-техн. праць. – Львів : РВВ НЛТУ України. – 2011. – Вип. 21.9. – С. 104-110.

17. Атаманюк В.М. Гідродинаміка стаціонарного шару гранульованого крупно пористого силікагелю / В.М. Атаманюк, Р.В. Ходорівський, М.М. Басістий // Науковий вісник НЛТУ України : зб. наук.-техн. праць. – Львів : РВВ НЛТУ України. – 2012. – Вип. 22.5. – С. 116-121.

**Атаманюк В.М., Кіндзера Д.П., Госовский Р.Р. Расчет коэффициента гидравлического сопротивления при движении теплового агента сквозь стационарный слой измельченных стеблей подсолнечника**

Приведены результаты расчета коэффициента гидравлического сопротивления, на основе уравнений Дарси-Вейсбаха, при движении теплового агента сквозь слой измельченных стеблей подсолнечника. Также проведен анализ максимального значения относительной погрешности между рассчитанными теоретическими значениями потерь давления  $\Delta P_m$  и экспериментальными  $\Delta P_e$ , не превышающей 20 %. Обоснована целесообразность использования отходов сельского хозяйства, в частности стеблей подсолнечника, для изготовления топливных брикетов.

**Ключевые слова:** измельченные стебли подсолнечника, альтернативные источники энергии, биомасса, полидисперсная смесь, гидродинамика, коэффициент гидравлического сопротивления.

**Atamanyuk V.M., Kindzera D.P., Gosovsky R.R. The calculation of the coefficient of hydraulic resistance in the thermal motion of the agent through the stationary layer of crushed sunflower stems**

The results of calculation of the coefficient of hydraulic resistance, based on the equations of Darcy-Veysbaha during the movement of heat the agent through layer of crushed sunflower stems. Also the analysis of maximum relative error between the calculated theoretical values of pressure loss  $\Delta P_m$  and experimental  $\Delta P_e$  not exceeding 20 %. Feasibility of using agricultural waste, including sunflower stalks for the manufacture of fuel briquettes.

**Keywords:** crushed sunflower stems, alternative energy, biomass, polydisperse mixture, hydrodynamics, the coefficient of hydraulic resistance.

УДК 614.843 (075.32) Проф. Е.М. Гуліда, д-р техн. наук; доц. І.О. Мовчан, канд. техн. наук – Львівський ДУ безпеки життєдіяльності

**ОЦІНЮВАННЯ ПОЖЕЖНОГО РИЗИКУ ДЛЯ СПОРУД ВИРОБНИЧОГО ПРИЗНАЧЕННЯ**

На підставі аналізу основних положень теорії надійності отримано залежності для визначення кількісної величини потенціального, індивідуального та соціального пожежних ризиків для споруд виробничого призначення. Отримані залежності дають змогу прогнозувати значення пожежних ризиків для реалізації пожежної безпеки об'єкта захисту та її наслідків для людей і матеріальних цінностей, що є дуже важливим для попередження можливості виникнення пожежі.

**Ключові слова:** пожежний ризик, пожежа, частота появи пожежі, інтенсивність відмов.

**Сучасний стан проблеми.** Перед тим, як розглянути методологію проведення аудиту пожежного ризику для споруд виробничого призначення, наведемо основні положення, визначення і типи пожежних ризиків для обгрунтованого подання поставленого питання. Згідно з даними роботи [1], які наведені відповідно до законодавства Російської Федерації, розглянемо основні визначення та рекомендації стосовно пожежних ризиків.

**Пожежний ризик** – міра можливості реалізації пожежної небезпеки об'єкта захисту та її наслідків для людей і матеріальних цінностей.

**Розрахунок пожежного ризику** – оцінка дії на людей вражаючих факторів пожежі та прийнятих заходів щодо зменшення частоти їх виникнення і наслідків. На підставі цього визначення можна сформулювати визначення оцінки пожежного ризику як аудиту пожежної безпеки.

**Оцінка пожежного ризику (аудит пожежної безпеки)** – діяльність з оцінки відповідності встановленим вимогам систем забезпечення пожежної безпеки.

**Індивідуальний пожежний ризик** – пожежний ризик, який може призвести до загибелі людини внаслідок дії небезпечних факторів пожежі.

**Соціальний пожежний ризик** – ступінь небезпечності, який призводить до загибелі групи людей внаслідок дії небезпечних факторів пожежі.

**Потенціальний пожежний ризик** – частота виникнення небезпечних факторів пожежі на території або в будівлі, яку розглядаємо.

Наведені визначення пожежних ризиків та їх допустимі значення згідно з рекомендаціями [1] розподіляють між об'єктами захисту так:

1. Для цивільних будівель (житлові, громадські та адміністративні) розглядають пожежний ризик та його оцінку, а також індивідуальний пожежний ризик. При цьому повинна виконуватися умова

$$\varepsilon_{ц.б} \leq [\varepsilon_{ц.б}]; \varepsilon_{ц.б.і} \leq [\varepsilon_{ц.б.і}], \quad (1)$$

де:  $\varepsilon_{ц.б}$  – розрахована величина пожежного ризику для цивільних будівель;  $[\varepsilon_{ц.б}] = 10^{-5}$  – нормативне значення пожежного ризику для цивільних будівель;  $\varepsilon_{ц.б.і}$  – розрахована величина індивідуального пожежного ризику для цивільних будівель;  $[\varepsilon_{ц.б.і}] = 10^{-6}$  – нормативне значення індивідуального пожежного ризику для цивільних будівель.

2. Для споруд виробничого призначення розглядають потенціальний пожежний ризик для будівель  $\varepsilon_{в.о.б}$  і території  $\varepsilon_{в.о.т}$ , а також соціальний пожежний ризик  $\varepsilon_{в.о.с}$  та індивідуальний пожежний ризик  $\varepsilon_{в.о.і}$ , значення яких не повинні перевищувати нормативні значення:

$$\varepsilon_{в.о.б} \leq [\varepsilon_{в.о.б}] = 10^{-5}; \varepsilon_{в.о.т} \leq [\varepsilon_{в.о.т}] = 10^{-6}; \varepsilon_{в.о.с} \leq [\varepsilon_{в.о.с}] = 10^{-7}; \varepsilon_{в.о.і} \leq [\varepsilon_{в.о.і}] = 10^{-4} \dots 10^{-6} \text{ – в приміщенні}; \varepsilon_{в.о.і} \leq [\varepsilon_{в.о.і}] = 10^{-8} \text{ – на території.} \quad (2)$$

Для довідки: індивідуальний пожежний ризик у Росії  $2,07 \cdot 10^{-4}$ ; у США –  $4,4 \cdot 10^{-5}$ ; в Японії –  $4,8 \cdot 10^{-5}$ ; у Великобританії та Франції –  $6,8 \cdot 10^{-5}$ .

Згідно з наказом МНС України від 29.01.2004 р., № 39, всі об'єкти поділено на групи, наприклад: споруди виробничого призначення; торговельно-складські споруди; соціально-культурні, громадські та адміністративні споруди; споруди сільськогосподарського призначення; споруди житлового сектору та інші.