

УДК 614.841.332:624.012.4

*С.В. Новак, канд. техн. наук, ст. наук. співроб., О.П. Якименко, канд. техн. наук*

### **ЗАСТОСУВАННЯ ВОГНЕЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ОПРАВ ТУНЕЛЬНИХ СПОРУД**

Досліджено особливості впливу на значення межі вогнестійкості залізобетонних оправ тунельних споруд температурних режимів пожежі, теплофізичних характеристик вогнезахисних покриттів та їх товщини. Обґрунтовано застосування для зазначених вище конструкцій нової ознаки граничного стану з вогнестійкості. Встановлено залежність необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття залізобетонних оправ тунельних споруд від значень його теплофізичних характеристик. Виявлено вплив різних температурних режимів пожежі на вогнезахисну здатність покриттів. Розроблено методику оцінювання вогнезахисної здатності покриттів залізобетонних оправ тунельних споруд, яка ґрунтується на положеннях експериментально-розрахункового методу, та рекомендації щодо підвищення вогнестійкості залізобетонних оправ тунельних споруд.

*Ключові слова:* вогнестійкість, вогнезахисна здатність, вогнезахисні покриття, залізобетонна оправа, прямі і обернені задачі теплопровідності, тунельна споруда, експериментально-розрахунковий метод.

*S.Novak, Cand. of Sc. (Eng.), Sen. St. Sc., O.Yakymenko, Cand. of Sc. (Eng.)*

### **APPLICATION OF FIRE RETARDANT COATINGS FOR RAISING FIRE RESISTANCE RATING OF FERROCONCRETE MOUNTINGS OF TUNNEL STRUCTURES**

Specific features concerned with the influence of temperature regimes of fire, and thermal and physical characteristics of some fire retardant coatings as well as their thickness upon fire resistance rating of ferroconcrete mountings of tunnel structures have been researched. Application of a new criterion of boundary conditions by fire resistance rating for such the constructions has been grounded. Dependency of the minimum required depth of some fire retardant coatings for ferroconcrete mountings of tunnel structures on the values of some of their thermal and physical parameters has been revealed. Effect of various temperature regimes of fire on fire retardant capability of the coatings has been disclosed. A method for the evaluation of fire retardant capability of the coatings for ferroconcrete mountings of tunnel structures has been developed that is based on the regulations of an experimental and calculation method, and some recommendations for raising fire resistance rating of ferroconcrete mountings of tunnel structures have been worked out, too.

*Keywords:* fire resistance rating, fire retardant capability, fire retardant coatings, ferroconcrete mounting, direct and indirect thermal conductivity problems, tunnel structure, experimental and calculation method.

В усьому світі спостерігається тенденція освоєння підземного простору для організації швидких та ефективних транспортних зв'язків. Такі потреби забезпечують транспортні тунельні споруди. Розгортається тунельне будівництво і в Україні. Вже сьогодні здійснюється реконструкція Бескидського залізничного тунелю на Закарпатті, розробляються проекти будівництва шести тунелів в місті Києві. Питання безпеки таких об'єктів і в нашій країні набуває актуальності.

Результати аналізу світових статистичних даних свідчать, що тунельні споруди є пожежонебезпечними об'єктами. Так, з 1970 року по теперішній час у тунельних спорудах сталося понад 50 пожеж, які супроводжувалися значною кількістю людських жертв та матеріальними втратами [1]. Основними причинами їх виникнення були:

- в) несправність електрообладнання та гальмівної системи транспортних засобів;
- г) порушення правил перевезення небезпечних вантажів.

Під час пожеж у транспортних тунелях внаслідок дії високої температури відбувається крихкоподібне руйнування захисного шару бетону оправ тунельних споруд, яке призводить до накопичення на поверхні шляхопроводів уламків, що суттєво ускладнює гасіння пожежі, проведення евакуації і рятувальних робіт. Викришування захисного шару бетону призводить до розкриття арматури, яка від дії високої температури пожежі швидко нагрівається до критичної температури і конструкція втрачає несучу здатність. На ліквідацію наслідків таких пожеж витрачаються значні кошти та тривалий час.

Слід зазначити, що під час проектування та будівництва більшості транспортних тунелів застосовувалися такі ж самі вимоги щодо вогнестійкості їх конструкцій, як і для будівельних конструкцій об'єктів промислового або громадського призначення, а саме: вогнестійкість забезпечувалась, в основному, захисним шаром бетону. Не враховувалися особливості поведінки залізобетонних оправ під час пожежі, зокрема таке явище, як крихкоподібне руйнування бетону під впливом високої температури [2]. Для запобігання цього небезпечного фактору слід використовувати вогнезахисні покриття або облицювання, які мають наноситись на поверхню залізобетонних конструкцій з необхідною товщиною. Аналіз літературних джерел показав, що на теперішній час відсутні дані щодо значень мінімальної товщини вогнезахисних покриттів для залізобетонних оправ тунельних споруд, які мають забезпечувати нормовані значення їх межі вогнестійкості з урахуванням недопущення крихкоподібного руйнування бетону [3].

Вогнестійкість залізобетонних конструкцій під час пожежі, а також способи їх вогнезахисту досліджувались і раніше, але, в основному, розглядалися конструкції, які застосовуються в житловому, громадському, промислового будівництві, для яких за граничний стан з вогнестійкості приймається обвалення конструкції або виникнення її граничних деформацій в умовах стандартного температурного режиму.

Питання впливу на межу вогнестійкості залізобетонних оправ тунельних споруд температурних режимів пожежі в тунелях, теплофізичних характеристик (ТФХ) вогнезахисних покриттів та їх товщини також не знайшли відображення у попередніх дослідженнях. Розкриття й врахування цих особливостей для наукового обґрунтування необхідних мінімальних значень товщини вогнезахисного покриття залізобетонних оправ тунельних споруд стало метою роботи.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- із застосуванням розрахункового методу виявити розбіжність у значеннях межі вогнестійкості залізобетонних оправ тунельних споруд за різних ознак їх граничного стану;
- виявити вплив на значення межі вогнестійкості залізобетонних оправ тунельних споруд температурних режимів пожежі, теплофізичних характеристик вогнезахисних покриттів та їх товщини;
- розробити методику оцінювання вогнезахисної здатності вогнезахисних покриттів залізобетонних оправ тунельних споруд із застосуванням експериментально-розрахункового методу;
- із застосуванням розробленої методики визначити залежність значень межі вогнестійкості залізобетонних оправ тунельних споруд від товщини вогнезахисних покриттів різних типів;
- за результатами теоретичних та експериментальних досліджень розробити рекомендації щодо підвищення вогнестійкості залізобетонних оправ тунельних споруд.

У роботі відповідно до першої задачі розрахунковим методом було визначено межу вогнестійкості залізобетонної оправи тунельної споруди із застосуванням різних ознак її граничного стану.

Для розв'язання поставленого завдання застосовувався метод, заснований на математичному моделюванні теплових процесів у конструкції оправи [4].

На першому етапі розглядалася залізобетонна оправа без вогнезахисного покриття товщиною 150 мм. Теплофізичні характеристики бетону задавалися відповідно до Єврокоду

2 [5]. Розглядався стандартний температурний режим пожежі. Отримані залежності температури на арматурі та на поверхні бетону наведено на рис. 1.

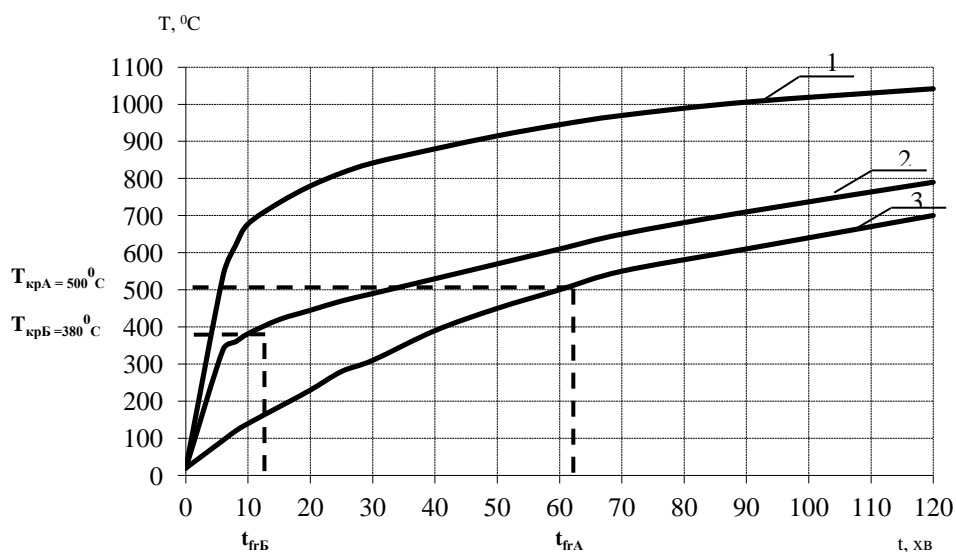


Рисунок 1 - Залежності температури на арматурі та на обігрівній поверхні бетону від часу вогневого впливу:

1 – стандартний температурний режим; 2 – температура на обігрівній поверхні бетону; 3 – температура на арматурі.

Із отриманих результатів випливає, що при застосуванні для залізобетонних оправ такої ознаки граничного стану як досягнення на обігрівній поверхні бетону критичної температури 380 оС, за якої відбувається його крихкоподібне руйнування, втрата вогнестійкості цих конструкцій настає вже на 10-ій хв від початку вогневого впливу, що значно раніше, ніж при застосуванні іншої ознаки – досягнення критичної температури 500 оС на сталевій арматурі, яка використовується для залізобетонних конструкцій на об'єктах промислового і громадського призначення.

На другому етапі було проведено розрахунки мінімальної товщини покриття для залізобетонної оправ з вогнезахистом із застосуванням зазначених вище ознак граничного стану і значень теплофізичних характеристик покриття. Отримані залежності наведено на рис. 2.

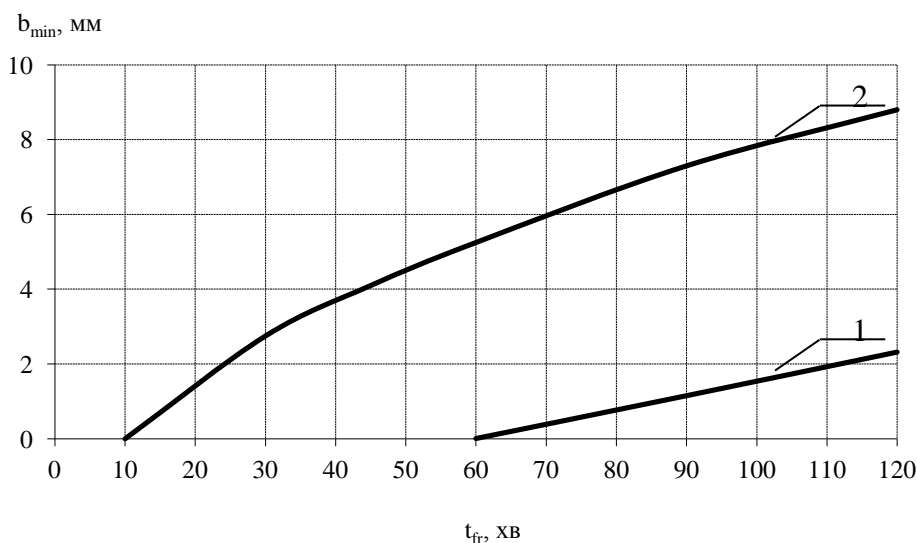


Рисунок 2 - Залежність мінімальної товщини вогнезахисного покриття від межі вогнестійкості оправ для різних ознак граничного стану з вогнестійкості: 1 – для ознаки

досягнення критичної температури на арматурі 500 оС; 2 – для ознаки досягнення критичної температури на обігрівній поверхні бетону під шаром вогнезахисного покриття 380 оС.

Із аналізу наведених на рис. 2 залежностей випливає, що за умов обрання ознаки граничного стану з вогнестійкості – досягнення критичного значення температури на арматурі – для конструкції забезпечується значення межі вогнестійкості до 60 хв без застосування вогнезахисного покриття. В той же час при обранні іншої ознаки ( $T_{крБ} = 380$  оС) максимальне значення межі вогнестійкості без застосування вогнезахисту становить 10 хв, а для забезпечення більшої межі вогнестійкості в оправі обов'язково необхідно застосовувати вогнезахисне покриття з певною товщиною. При цьому значення цієї товщини у декілька разів більше, ніж при застосуванні ознаки граничного стану – 500 оС на арматурі.

Таким чином, було встановлено, що обрання граничного стану з вогнестійкості за ознакою досягнення критичного значення температури на сталевій арматурі 500 оС може призводити до помилкових результатів у визначенні мінімальної товщини вогнезахисного покриття і недостовірної оцінки вогнестійкості залізобетонних оправ під час проектування транспортних тунелів.

Наступним етапом досліджень відповідно до поставлених задач було вивчення впливу температурних режимів пожежі та ТФХ вогнезахисних покриттів (коефіцієнту теплопровідності  $\lambda_{ВП}$  та питомої об'ємної теплоємності  $c_{рВП}$ ) на їх мінімальну товщину, необхідну для забезпечення нормованої межі вогнестійкості залізобетонної оправ. Розглядалися температурні режими пожежі, які застосовуються під час оцінки вогнестійкості залізобетонних оправ тунельних споруд у різних країнах, зокрема в Росії, Німеччині, Нідерландах [6] і такі діапазони значень ТФХ вогнезахисного покриття:  $\lambda_{ВП} = 0,01; 0,1; 0,3$  Вт·м-1·°С-1,  $c_{рВП} = 3 \cdot 104; 3 \cdot 105; 3 \cdot 106$  Дж·м-3·°С-1.

У таблиці 1 наведено значення мінімальної товщини вогнезахисного покриття для різних температурних режимів пожежі в тунелі і нормованої межі вогнестійкості, визначених для певних значень ТФХ покриття.

Таблиця 1 - Розрахункові значення мінімальної товщини вогнезахисного покриття для різних температурних режимів і значень  $\lambda_{ВП} = 0,1$  Вт·м-1·°С-1,  $c_{рВП} = 3 \cdot 105$  Дж·м-3·°С-1

Нормована межа вогнестійкості оправ $t_{fr}$ , хв	Мінімальна товщина шару вогнезахисного покриття $b_{min}$ , мм			
	режим № 1	режим № 2	режим № 3	режим № 4
30	2,75	5,07	6,76	6,60
45	4,10	6,40	8,00	8,34
60	5,25	7,50	9,10	9,93
90	7,30	9,33	11,05	12,29
120	8,80	10,84	12,75	13,60

\* режим № 1 - стандартний температурний режим  
 режим № 2 – режим вуглеводневої пожежі  
 режим № 3 – режим RABT/ZTV зі стадією охолодження  
 режим № 4 – режим RWS

Із отриманих результатів розрахунків випливає, що найменші значення цієї товщини мають місце для стандартного температурного режиму, а для інших температурних режимів вони значно більші. Це свідчить про те, що оцінювання вогнезахисної здатності покриттів залізобетонних оправ тунельних споруд необхідно проводити з урахуванням сценарію можливої пожежі у тунелі.

Результати дослідження впливу теплофізичних характеристик вогнезахисних покриттів на значення їх мінімальної товщини показали, що ця товщина суттєво залежить від значення коефіцієнту теплопровідності, а вплив питомої об'ємної теплоємності незначний. Наприклад, на рис. 3, 4 наведено такі залежності для різних нормованих значень межі вогнестійкості в умовах режиму вуглеводневої пожежі. З цих рисунків випливає, що збільшення коефіцієнту теплопровідності на порядок призводить до підвищення мінімальної товщини вогнезахисного покриття у 7-8 разів, а збільшення питомої об'ємної теплоємності на порядок призводить до зменшення мінімальної товщини вогнезахисного покриття тільки на 20-30%. Для інших режимів зазначені залежності мають аналогічний характер. Із аналізу отриманих результатів розрахунків також визначено, що найбільше зростання мінімальної товщини вогнезахисного покриття має місце для найбільшого значення коефіцієнту теплопровідності з обраного діапазону.

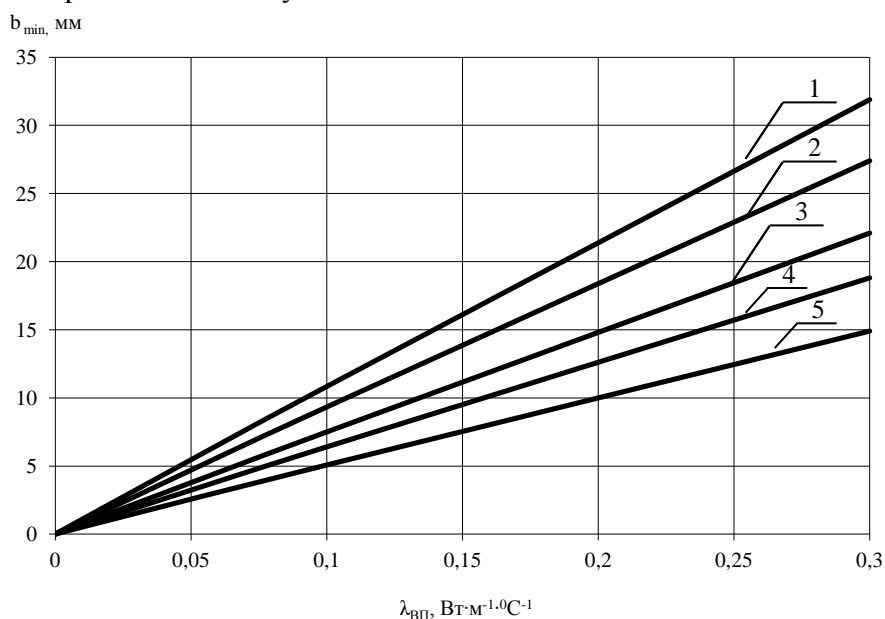


Рисунок 3 - Залежність мінімальної товщини вогнезахисного покриття від його коефіцієнту теплопровідності для різних значень межі вогнестійкості в умовах режиму вуглеводневої пожежі: 1 – tfr = 120 хв; 2 – tfr = 90 хв; 3 – tfr = 60 хв; 4 – tfr = 45 хв; 5 – tfr = 30 хв.

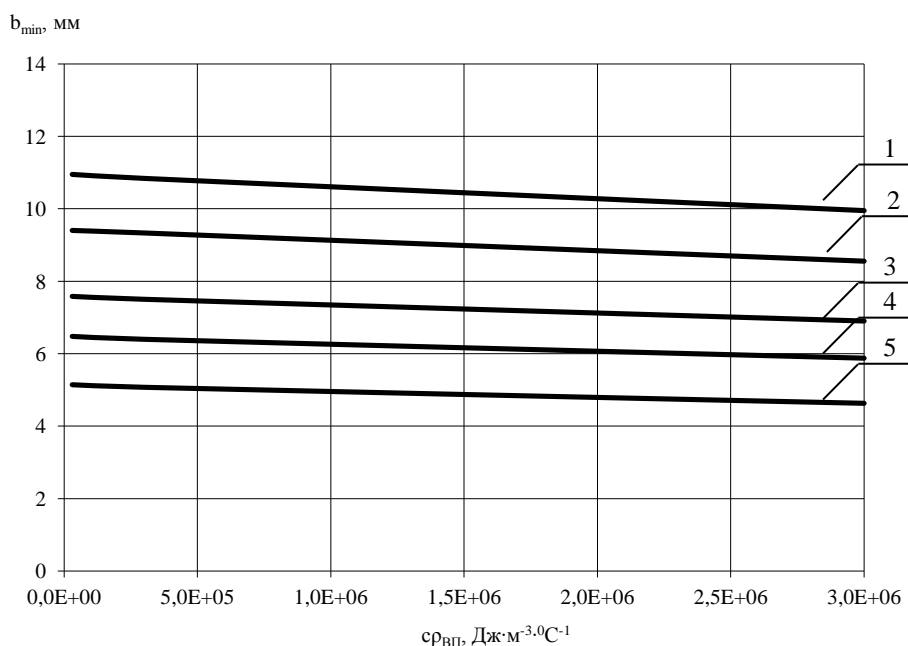


Рисунок 4 - Залежність мінімальної товщини вогнезахисного покриття від його питомої об'ємної теплоємності для різних значень межі вогнестійкості в умовах режиму вуглеводневої пожежі: 1 –  $t_{fr} = 120$  хв; 2 –  $t_{fr} = 90$  хв; 3 –  $t_{fr} = 60$  хв; 4 –  $t_{fr} = 45$  хв; 5 –  $t_{fr} = 30$  хв.

Таким чином, можна зробити висновок, що для забезпечення нормованої межі вогнестійкості залізобетонних оправ тунельних споруд ефективними будуть покриття, які мають мінімальні значення коефіцієнту теплопровідності, а питома об'ємна теплоємність покриттів не впливає на їх вогнезахисну здатність.

З урахуванням отриманих результатів досліджень було розроблено методику оцінювання вогнезахисної здатності вогнезахисних покриттів залізобетонних оправ тунельних споруд, яка ґрунтується на експериментально-розрахунковому методі та містить такі етапи: експериментальне визначення температури у зразках конструкції із вогнезахисним покриттям в умовах вогневого впливу, розв'язання оберненої задачі теплопровідності (ОЗТ) для визначення теплофізичних характеристик вогнезахисного покриття та прямої задачі теплопровідності (ПЗТ) для визначення його необхідної мінімальної товщини.

З метою обґрунтування оптимальної кількості зразків для експериментального визначення температури на їх обігрівній бетонній поверхні під шаром вогнезахисного покриття було проведено дослідження впливу похибки у вимірюванні цієї температури, а також похибки у завданні теплофізичних характеристик бетону на точність визначення мінімальної товщини вогнезахисного покриття, яка забезпечує нормоване значення межі вогнестійкості. Для зазначених досліджень було застосовано метод обчислювального експерименту [7]. Отримані результати цих досліджень свідчать про те, що у разі застосування як одного, так і двох експериментів досягаються стійкі рішення ОЗТ при значних випадкових похибках (до 50%) у визначенні температури на обігрівній поверхні зразка під шаром вогнезахисного покриття. При цьому, похибки у визначенні необхідної мінімальної товщини покриття майже однакові як під час застосування даних одного, так і двох експериментів.

Під час визначення впливу похибки у завданні теплофізичних характеристик бетону на точність визначення мінімальної товщини вогнезахисного покриття було встановлено, що при застосуванні даних одного експерименту і відхилення ТФХ бетону на 50% максимальна похибка у визначенні товщини покриття становить 11%. Застосування даних двох експериментів одночасно під час розв'язання ОЗТ дозволяє зменшити цю похибку у 3 рази, а використання даних трьох експериментів не призводить до її подальшого зменшення.

Таким чином, було науково обґрунтовано, що для оцінки вогнезахисної здатності покриття необхідно і достатньо використовувати два зразки для експериментального визначення температури на їх обігрівній поверхні, які мають різні значення товщини цього вогнезахисного покриття.

Розроблена методика була апробована, та з її застосуванням визначено вогнезахисну здатність двох видів вогнезахисних покриттів залізобетонних оправ, а саме штукатурного покриття «Неоспрей» виробництва фірми «А+В» (Україна) та облицювальних вогнезахисних плит «Promatect L500» («Promat», Німеччина).

У таблицях 2 і 3 наведено значення необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття «Неоспрей» та плитного матеріалу «Promatect L500» для забезпечення нормованої межі вогнестійкості при різних температурних режимах, які були визначені шляхом розв'язання ПЗТ.

Таблиця 2 - Розрахункові значення мінімальної товщини вогнезахисного покриття «Неоспрей» для забезпечення нормованої межі вогнестійкості залізобетонних опор для різних температурних режимів пожежі

Температурні режими пожежі*	Мінімальна товщина покриття $b_{min}$ , мм для нормованої межі вогнестійкості $t_{fr}$ , хв				
	$t_{fr} = 30$	$t_{fr} = 45$	$t_{fr} = 60$	$t_{fr} = 90$	$t_{fr} = 120$
1	4,82	7,15	9,25	13,12	16,65
2	9,37	12,15	14,35	17,85	20,85
3	12,00	15,28	18,25	24,70	28,90
4	13,00	16,95	20,30	25,53	28,85

\* режим № 1 - стандартний температурний режим  
 режим № 2 – режим вуглеводневої пожежі  
 режим № 3 – режим RABT/ZTV зі стадією охолодження  
 режим № 4 – режим RWS

Таблиця 3 - Розрахункові значення мінімальної товщини вогнезахисних плит «Promatect L500» для забезпечення нормованої межі вогнестійкості залізобетонних опор для різних температурних режимів пожежі

Температурні режими пожежі*	Мінімальна товщина покриття $b_{min}$ , мм для нормованої межі вогнестійкості $t_{fr}$ , хв				
	$t_{fr} = 30$	$t_{fr} = 45$	$t_{fr} = 60$	$t_{fr} = 90$	$t_{fr} = 120$
1	5,27	6,79	8,05	10,50	12,82
2	6,81	8,78	10,18	12,58	14,82
3	8,63	10,95	13,28	16,75	20,33
4	9,49	12,52	15,17	18,35	19,92

\* режим № 1 - стандартний температурний режим  
 режим № 2 – режим вуглеводневої пожежі  
 режим № 3 – режим RABT/ZTV зі стадією охолодження  
 режим № 4 – режим RWS

За результатами проведених досліджень розроблено рекомендації щодо підвищення вогнестійкості залізобетонних опор тунельних споруд, що призначені для фахівців проектних, будівельних, інших організацій, діяльність яких пов'язана зі створенням об'єктів тунельного будівництва. Зазначені рекомендації були застосовані під час проектування систем вогнезахисту транспортних тунельних споруд, зокрема, Гемрінського автодорожнього тунелю та тунелю № 1 на автомобільній трасі «Адлер - Красная поляна» (Російська Федерація).

#### Висновки

Розрахунковим методом доведено, що втрата вогнестійкості залізобетонної опори без вогнезахисного покриття в умовах стандартного температурного режиму настає вже на 10 - й хвилині від початку вогневого впливу, в той же час найменше нормоване значення межі вогнестійкості залізобетонних опор становить 30 хв, тому, для забезпечення нормованих значень межі вогнестійкості залізобетонних опор тунельних споруд обов'язково необхідно застосовувати вогнезахисні покриття.

Виявлено, що застосування такої ознаки граничного стану з вогнестійкості залізобетонних опор як досягнення на арматурі критичного значення температури  $T_{кр А} = 500$  оС, може призвести до помилкових розрахунків вогнезахисної здатності покриттів залізобетонних опор та до невірної оцінки вогнестійкості цих конструкцій під час проектування тунельних споруд. Ознакою граничного стану з вогнестійкості залізобетонних

оправ тунельних споруд має бути досягнення критичного значення температури  $T_{кр\ B} = 380$  оС на обігрівній бетонній поверхні під шаром вогнезахисного покриття.

Встановлено, що температурні режими пожежі суттєво впливають на розрахункові значення мінімальної товщини вогнезахисного покриття. Так, найбільші значення цього показника відмічаються для температурного режиму RWS, а найменші – для стандартного температурного режиму.

Встановлено, що теплофізичні характеристики вогнезахисного покриття впливають на значення його мінімальної товщини, які забезпечують нормовану межу вогнестійкості залізобетонної оправи. При цьому за однакового режиму пожежі збільшення коефіцієнту теплопровідності від 0,03 до 0,3 Вт·м-1·°С-1 призводить до зростання розрахункової мінімальної товщини покриття у 7 – 8 разів, а змінення питомої об'ємної теплоємності від  $3 \cdot 10^5$  до  $3 \cdot 10^6$  Дж·м-3·°С-1 призводить до зменшення розрахункової мінімальної товщини покриття на 20-30 %.

Розроблено методику оцінювання вогнезахисної здатності покриттів для залізобетонних оправ тунельних споруд, яка ґрунтується на експериментально-розрахунковому методі та дозволяє визначати мінімальну товщину вогнезахисного покриття для забезпечення нормованого значення межі вогнестійкості таких конструкцій. За зазначеною методикою визначено необхідні мінімальні товщини вогнезахисних плит «PROMATECT L500» та штукатурного покриття «Неоспрей», які забезпечують значення межі вогнестійкості залізобетонної оправи 30; 45; 60; 90; 120 хв за умов впливу різних температурних режимів пожежі. Найбільші значення мінімальної товщини вогнезахисних покриттів (як плитного матеріалу так і штукатурки) відмічаються для температурного режиму RWS, найменші – для стандартного температурного режиму.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Chronology: Serious tunnel accidents since 1970.: <http://eurotap-database.com/main.cgi>.
2. Компанеец С. А. Проектирование тоннелей / Поправко А. К., Богорадцкий А. А. – М.: Транспорт, 1973. – 320 с.
3. Некрасов К. Д, Рекомендации по защите бетонных и железобетонных конструкций от хрупкого разрушения при пожаре /К. Д. Некрасов, В. В. Жуков, В. Ф. Гуляева. – М.: Стройиздат, 1979. – 22 с.
4. Якименко О. П. Вплив температурних режимів пожежі та теплофізичних властивостей матеріалів на характеристику вогнезахисної здатності покриттів залізобетонних оправ тунельних споруд / О. П. Якименко, С. В. Новак // Науковий вісник УкрНДІПБ. – 2012. – № 1(25). – С. 118 –121.
5. EN 1992-1-2: 2004 Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1–2: General rules – Structural fire design (Єврокод 2: Проектування залізобетонних конструкцій – Частина 1–2: Загальні вимоги. Вогнестійкість).
6. Новак С. В. Особливості оцінювання вогнестійкості залізобетонних конструкцій оправ тунельних споруд з вогнезахисним покриттям / С. В. Новак, Л. М. Нефедченко, О. П. Якименко // Науковий вісник УкрНДІПБ. – 2009. – № 1(19). – С. 49 – 55.
7. Круковский П. Г. Обратные задачи тепломассопереноса (общий инженерный подход) / Павел Григорьевич Круковский. – Киев.: Институт технической теплофизики НАН Украины, 1991. – 218 с.

