

канд. техн. наук **ЯКОВЧУК Р.С. / YAKOVCHUK R.S., Ph.D.¹**

канд. техн. наук **ВЕСЕЛИВСКИЙ Р.Б. / VESELIVSKIY R.B., Ph.D.¹**

Przyjęty/Accepted/Принята: 14.02.2014;

Zrecenzowany/Reviewed/Рецензирована: 15.07.2014;

Opublikowany/Published/Опубликована: 31.12.2014;

ИССЛЕДОВАНИЕ ОГНЕЗАЩИТНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ НАПОЛНЕННЫХ КРЕМНИЙОРГАНИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ БЕТОНА²

Effectiveness Testing of Filled Silicon Organic Coatings for Concrete

Badania skuteczności pożarowej powłok krzemooorganicznych z wypełniaczem stosowanych do betonu

Аннотация

Цель: Целью работы является исследование огнезащитной эффективности разработанного вещества для защиты бетонных конструкций от воздействия высоких температур и открытого пламени при пожаре.

Введение: Огнезащитная способность наполненных кремнийорганических покрытий основывается на создании вспученного термоизоляционного слоя, который образуется на поверхности бетонной конструкции при температуре 473-773 К. Этот слой не позволяет огню повредить строительные конструкции, а высокой температуре, возникающей при пожаре, нагревать их до критических значений, при которых они будут терять свою несущую способность и разрушатся.

Методы: Огнезащитную способность покрытия для бетона определяли по стандартизированной методике, которая базируется на определении линейного коэффициента вспучивания материала покрытия, согласно ДСТУ-Н-П Б В.1.1-29-2010 Огнезащитная обработка строительных конструкций. Общие требования и методы контроля. Настоящий стандарт устанавливает общие требования и методы контроля огнезащитной способности средств огнезащиты при приеме выполненных работ по огнезащитной обработке строительных конструкций, идентификации и последующей эксплуатации.

Результаты: Результаты экспериментальных исследований подтвердили правильность выбора компонентного состава наполненных кремнийорганических покрытий для бетона. Предложенное огнезащитное вещество при нагревании имеет высокую защитную эффективность благодаря образованию вспученного термоизоляционного слоя с низкими показателями теплопроводности и высоким линейным коэффициентом вспучивания. Определено, что составы огнезащитных веществ № 3 и № 4 характеризуются высокими линейными коэффициентами вспучивания и низкими характеристиками коэффициентов теплопроводности, что, в свою очередь является важными показателями эффективности огнезащиты для бетонных строительных конструкций. Лучшие характеристики имеет огнезащитное вещество состава № 3, для которого $\lambda = 0,058$ Вт / м·К и $K_d = 12,3$.

Выводы: Целесообразность использования вспучивающихся огнезащитных покрытий обусловлена тем, что они тонкослойные, при нагревании не выделяют токсичных веществ, имеют высокую огнезащитную эффективность, а их приготовления и нанесения на поверхность позволяет применять общепринятую в лакокрасочной промышленности технологию. Образование слоя с оптимальными защитными свойствами определяется в значительной степени составом разработанного огнезащитного вещества, количественным соотношением между компонентами и химическими процессами, протекающими при его формировании.

Ключевые слова: огнестойкость, трещиностойкость, огнезащитное вещество, огнезащита, адгезия, теплопроводность

Вид статьи: оригинальная научная статья

Abstract

Aim: The purpose of this research is to study the fire retardant effectiveness of developed substances for use in protection of concrete structures against high temperatures and open fire flames.

¹ Львовский государственный университет безопасности жизнедеятельности, Украина, 79000, Львов, ул. Клепаровская, 35; e-mail: roman_veselivskuy@yahoo.com / Lviv State University of Life Safety;

² Авторы внесли одинаковый вклад в создание статьи / The authors contributed equally to this article;

Introduction: Fire-retardant capability of filled silicon organic coatings is based on the creation of an expanded thermal insulation layer, which is formed on the surface of concrete structures at a temperature of 473-773 K. This layer protects construction structures from fire damage, and high temperatures which occur during a fire incident. The structures heat up to a critical temperature level, at which point they lose their load bearing capacity and collapse.

Methods: Fire retardant capability of coatings for concrete was determined by a standardized method based on identifying the linear coefficient of coating expansion, in accordance with the Ukraine Fire Protection "State Standard -N-P B V.11-29-2010 - Fire Retardant Treatment of Building Structures, General Requirements and Methods of Control". This Standard specifies general requirements and fire retardant capability control methods during commissioning of completed building structures, which were exposed to fire-retardant treatment, identification and subsequent use.

Results: Results from experimental studies confirmed that the selected composition components of filled silicon organic coatings for concrete was appropriate. The proposed fire retardant substance has high protective efficiency properties during heating, due to the formation of an expanded insulation layer with a low thermal conductivity index and high coefficient of linear expansion. It was determined that the composition of fire retardant substances, number 3 and 4, are characterized by the highest linear coefficient of swelling and the lowest thermal conductivity index. These are important indicators of fire protection effectiveness for concrete structures. The best specifications are revealed by fire retardant substance number 3, for which $\lambda = 0,058 \text{ Wt} / \text{m} \cdot \text{K}$ and $KI = 12.3$.

Conclusions: The use of expanding fire protective coatings is appropriate because the substances are thin-layered, do not emit toxic elements when heated and are very effective in fire-retardant performance. Their preparation and application to the surface enables the use of current conventional technology in the paint and varnish industry. The formation of a layer with optimum protective properties, when coating is exposed to high temperatures, is determined largely by the developed fire retardant composition of elements making up the substance and quantitative relationship between components, and ultimately the chemical process which occurs during production.

Keywords: fire resistance, crack resistance, fire-retardant coating, fire protection, adhesion, thermal conductivity

Type of article: original scientific article

Abstrakt

Wprowadzenie: Powłoki krzemooorganiczne z wypełniaczem wykazują zdolność ogniochronną poprzez tworzenie spęczniałej warstwy termoizolacyjnej na powierzchni konstrukcji betonowej przy temperaturze 473-773 K. Warstwa ta nie pozwala na uszkodzenie przez ogień konstrukcji budowlanych, a przy wysokiej temperaturze podczas pożaru zatrzymuje nagrzewanie się konstrukcji do punktu krytycznego, przy którym konstrukcje tracą swoją nośność i ulegają zniszczeniu. Celem pracy jest zbadanie skuteczności ogniochronnej opracowanej substancji przeznaczonej do ochrony konstrukcji betonowych przed oddziaływaniem wysokich temperatur i otwartym ogniem w warunkach pożaru.

Metody: Zdolność ogniochronna powłoki do betonu była obliczana według normatywnej metodologii, bazującej na określeniu współczynnika liniowego pęcznienia materiału powłoki, zgodnie z normą „ДСТУ-Н-П Б В.1.1-29-2010. Обработка огнестойкая конструкций строительных. Общие требования и методы контроля”. Dana norma określa ogólne wymagania i metody kontroli właściwości ogniochronnych środków ogniochronnych podczas odbioru wykonanych prac związanych z obróbką ogniochronną konstrukcji budowlanych, identyfikacji i późniejszej eksploatacji.

Wyniki: Wyniki badań eksperymentalnych potwierdziły słuszność wyboru elementów składowych krzemooorganicznych powłok z wypełniaczem do betonu. Zaproponowana substancja ogniochronna podczas nagrzewania wykazuje wysoką skuteczność ogniochronną dzięki wytworzeniu spęczniającej się warstwy termoizolacyjnej o niskim współczynniku przewodzenia ciepła i wysokim współczynniku liniowym pęcznienia. Ustalono, iż skład substancji chemicznych nr 3 i nr 4 charakteryzuje wysoki liniowy współczynnik pęcznienia i niskie wartości współczynników przewodzenia ciepła, które są ważnymi charakterystykami decydującymi o skuteczności ogniochronnej betonowych konstrukcji budowlanych. Najlepsze właściwości wykazuje substancja ogniochronna nr 3, dla której wartości wynoszą $\lambda = 0,058 \text{ W} / \text{m} \cdot \text{K}$ i $K_f = 12,3$.

Wnioski: Słuszność zastosowania pęczniących powłok ogniochronnych jest uzasadniona tym, że są one cienkowarstwowe, przy nagrzewaniu nie wydzielają substancji toksycznych oraz charakteryzują się wysoką skutecznością ogniochronną, a ich przygotowanie i naniesienie na powierzchnię może odbywać się przy użyciu powszechnie stosowanej w przemyśle lakierniczym technologii. Tworzenie warstwy o optymalnych właściwościach ochronnych w dużym stopniu zależy od opracowania składu substancji ogniochronnej oraz stosunku ilościowego pomiędzy elementami i procesami chemicznymi zachodzącymi podczas jej formowania.

Słowa kluczowe: odporność ogniowa, odporność na pękanie, środek ogniochronny, ochrona ogniowa, adhezja, przewodzenie ciepła

Typ artykułu: oryginalny artykuł naukowy

1. Введение

Строительные конструкции в обычных условиях эксплуатации могут хранить необходимые рабочие свойства в течение десятков лет. В условиях пожара эти же конструкции очень быстро теряют свои эксплуатационные качества, разрушаются или теряют способность препятствовать распространению огня. Одной из основных опасностей во время пожара в здании является снижение прочности и обрушение несущих конструкций (металлических, железобетонных) под воздействием открытого пламени и высоких температур. Как показывает практика, люди при

пожаре гибнут в основном не от ожогов, а от травм, связанных с разрушением строительных конструкций и отравлением токсичными продуктами горения.

Во время пожара температура в зоне горения может превышать 1273 K [1]. В этих условиях элементы несущих конструкций испытывают значительные термические напряжения, а локальная температура элементов конструкций может превысить критическую черту. Разрушение конструкций происходит через высокое давления пара в порах бетона под воздействием термических напряжений, а также через разницы

в коэффициентах температурного расширения различных заполнителей бетона.

Таким образом, при воздействии на бетон высоких температур во время пожара в его структуре происходят необратимые деструкционные изменения. Учитывая недостаточную долговечность бетона и изделий на его основе, связанную с деструктивными процессами в поверхностных слоях при эксплуатации и действии огня, целесообразным является защита их поверхности от воздействия агрессивных факторов путем нанесения огнезащитных веществ.

Использование огнезащитных веществ на основе кремнийорганических композиций, которые при нагревании переходят в керамический материал, позволяет значительно расширить температурный интервал использования указанных изделий. Разработка составов таких веществ основывается на использовании связки и наполнителя с высокой температуростойкостью, а также их способности при нагревании взаимодействовать между собой с образованием керамико-матричного композиционного материала, который не окисляется и устойчив к воздействию огня. Рациональный подбор компонентов способствует обеспечению высоких теплозащитных свойств покрытия, что в свою очередь позволит длительное время защищать бетонные строительные конструкции от воздействия теплового излучения и открытого пламени, предотвратит трещинообразование и обеспечит надежную эксплуатацию конструкций в течение длительного времени.

Огнезащитная эффективность таких покрытий основывается на создании вспученного термоизоляционного слоя, который образуется на поверхности бетонной конструкции при температуре 473-773 К. Благодаря низкой теплопроводности, пористый термоизоляционный слой покрытия предотвращает быстрый прогрев защищенной строительной конструкции. Поэтому исследования огнезащитной эффективности покрытия является важной технической задачей.

2. Анализ последних исследований и публикаций

Огнезащита бетонных строительных конструкций играет важную роль в системе обеспечения пожарной безопасности различных объектов. В настоящее время в практике огнезащиты широко используют метод обработки огнезащитными покрытиями различного компонентного состава [2]. Тонкослойные покрытия, которые обладают способностью вспучиваться, занимают значительное место среди средств огнезащиты, применяемых сегодня [3]. Для термозащиты применяют многослойные кремниевые покрытия, число слоев которых достигает 6...8. Внешнее покрытие состоит из следующих элементов ($R_2O_3 \cdot SiO_2$; $2R_2O_3 \cdot 3SiO_2$; $R_2O_3 \cdot SiO_2$, где R – Sc, Tm, Yb, Gd, Th или их комбинации) [4]. В качестве промежуточного слоя использованы слои муллита, алюмосиликатов магния, кальция, бария и антикоррозионные составы – гафния оксид и силикат, скандия и иттербия силикаты. Внутренний

слой – оксиды и силикаты гафния и циркония. Температурный коэффициент линейного расширения слоев изменяется в пределах $(40...60) \cdot 10^{-7} K^{-1}$ и обеспечивает прочное сцепление с поверхностью подкладок.

О разработке новых составов огнестойких покрытий для защиты бетонных конструкций на основе наполненных компонентами оксидов кремнийорганических полимеров, описано в [5].

3. Методы

Огнезащитную способность покрытия для бетона определяли по методике [6], которая базируется на определении линейного коэффициента вспучивания огнезащитного материала.

Сущность метода определения линейного коэффициента вспучивания заключается в определении отношения толщины огнезащитного материала, нанесенного на стальную пластину, до и после воздействия температуры 613 К. Для испытаний по методу определения линейного коэффициента вспучивания огнезащитные вещества (краски, лаки) наносят по технологии предприятия-производителя на две стальные квадратные пластины со стороной (50 ± 1) мм и толщиной $(2,0 \pm 0,2)$ мм.

Толщина слоя покрытия после высыхания должна составлять $(1,0 \pm 0,5)$ мм. Допускается нанесение слоя другой толщины, если это предусмотрено технологией предприятия-изготовителя. С огнезащитных материалов, поставляемых в виде лент, пластин и т.п., вырезают образцы длиной (50 ± 1) мм и фактической шириной, но не более (50 ± 1) мм, которые накладывают или наклеивают на стальные пластины согласно технологии предприятия-изготовителя.

Подготовленные образцы высушивают при температуре (20 ± 5) °С в течение 48 часов и при температуре (70 ± 5) °С в течение 3 часов. После охлаждения до температуры окружающей среды измеряют толщину слоя покрытия из огнезащитного материала h_n по формуле:

$$h_n = h_z + h_m, \quad (1)$$

где h_z – толщина образца (вместе со стальной пластиной), мм;

h_m – толщина стальной пластины, мм.

Устройством регулирования, поддержания и контроля температуры в печи задают температуру (340 ± 5) °С и доводят ее до постоянной температуры в течение не менее 1 часа.

Два образца вносят в печь за время не более 20 секунд. После закрытия печи включается секундомер. Через 20 минут пластины вынимают из печи и устанавливают на поверхность из негорючего материала для охлаждения. Через 30 минут штангенциркулем определяется средняя высота вспученного слоя материала h_c на каждой пластине.

Для определения среднего значения высоты измеряют высоту в пяти точках в центре пластины

и в средних точках между центром и углами пластины.

По результатам испытаний по методу определения линейного коэффициента вспучивания рассчитывается коэффициент вспучивания на пластинах K_n по формуле:

$$K_n = 0,5 (h_{c1} / h_{n1} + h_{c2} / h_{n2}), \quad (2)$$

где h_{c1} , h_{c2} – средние значения толщины вспученного слоя материала на первой и второй пластинах, мм;
 h_{n1} , h_{n2} – средние значения толщины начального слоя материала на первой и второй пластинах, мм.

Экспериментальное определение коэффициентов теплопроводности исследуемых составов покрытий и бетона было проведено с помощью динамического измерителя теплопроводности ИТ- λ -400, методом монотонного теплового нагрева.

4. Результаты

Огнезащитное средство считается выдержавшим испытания, если значение коэффициента вспучивания составляет не менее 80% от значения коэффициента вспучивания, представленного компанией-производи-

телем в технологическом регламенте на соответствующее огнезащитное средство.

Проведенными исследованиями установлено линейные коэффициенты вспучивания и теплопроводности для четырех составов огнезащитных покрытий, которые приведены в табл. 1.

На рис. 1 и табл. 2 представлены зависимости коэффициента теплопроводности огнезащищенного бетона при нагревании.

Уменьшение коэффициента теплопроводности огнезащищенного бетона подтверждается образованием на его поверхности теплоизоляционного поризованного слоя. Исходное покрытие (рис. 2 а) представлено плотно соединенными между собой частицами оксидного наполнителя полиметилфенилсилоксановой связкой. Нагревание до 623 К благодаря термоокислительной деструкции связки приводит к образованию округлых пор с частичным разрывом связей между отдельными частицами наполнителя (рис. 2 б). При температуре нагрева 873 К (рис. 2 в) в структуре покрытия появляется значительное количество пор различной конфигурации, а частицы наполнителя частично оплавляются. Нагревание до 1273 К (рис. 2 г) приводит к образованию на поверхности бетона сильно поризованного огнезащитного слоя.

Таблица 1.

Линейные коэффициенты вспучивания и теплопроводности исследуемых составов покрытий

Table 1.

Linear coefficients of thermal conductivity and expansion of the investigated coating compositions

№ состава Покрытия Number of coating composition	Линейный коэффициент вспучивания, K_n Linear coefficients of expansion	Коэффициент теплопроводности, $\lambda, \frac{Вт}{м \cdot К}$ ($T = 613K$) Coefficient of thermal conductivity
1	11,9	0,075
2	12,1	0,068
3	12,2	0,063
4	12,3	0,058

Источник: Собственное исследование.

Source: Own elaboration.

Таблица 2.

Коэффициенты теплопроводности огнезащищенного бетона при нагревании

Table 2.

Coefficients of thermal conductivity of fire resistant concrete during heating

№ состава Покрытия Number of coating composition	Коэффициент теплопроводности, $\lambda, \frac{Вт}{м \cdot К}$ Coefficient of thermal conductivity			
	293 К	623 К	873 К	1273 К
Без покрытия Without coating	0,95	0,78	0,59	0,50
1	0,92	0,62	0,50	0,44
2	0,92	0,51	0,48	0,42
3	0,91	0,46	0,43	0,40
4	0,91	0,43	0,40	0,38

Источник: Собственное исследование.

Source: Own elaboration.

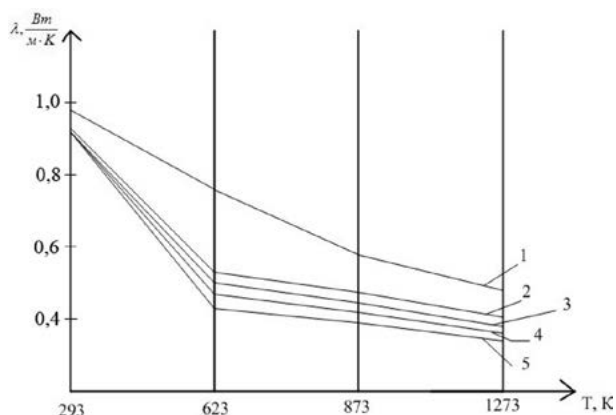


Рис. 1. Зависимость коэффициента теплопроводности огнезащитного бетона от температуры: 1- незащищенный бетон; 2- бетон защищен покрытием состава № 1; 3- бетон защищен покрытием состава № 2; 4- бетон защищен покрытием состава № 3; 5- бетон защищен покрытием состава № 4

Fig. 1. The dependence of thermal conductivity coefficient of the fire-protected concrete on the temperature: unprotected concrete; 2- concrete protected by coating composition No. 1; 3- concrete protected by coating composition No. 2; 4- concrete protected by coating composition No. 3; 5- concrete protected by coating composition No. 4

Источник: Собственное исследование.

Source: Own elaboration.

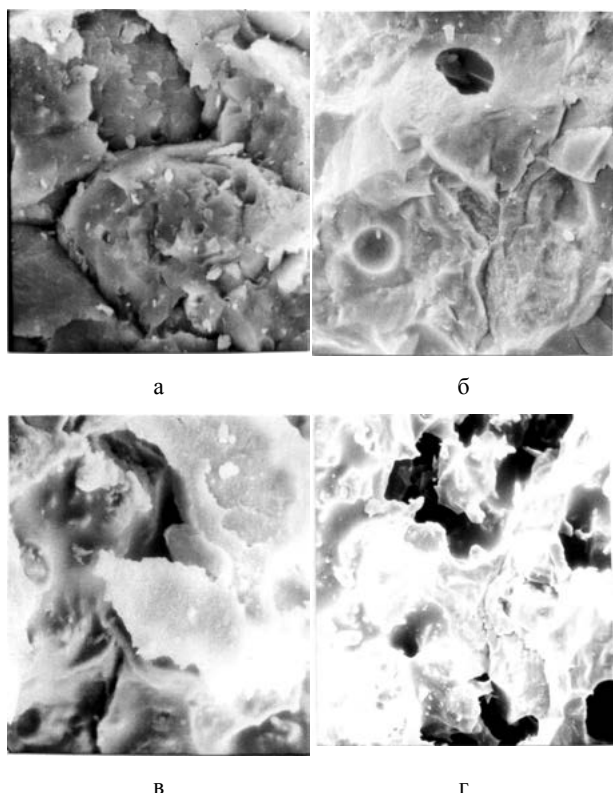


Рис. 2. Изменение микроструктуры защитного покрытия при нагревании: а- исходное; б- 623 К; в- 873 К; г- 1273 К

Fig. 2. Changes in the microstructure of the protective coating during heating

a- origin; б- 623 K; в- 873 K; г- 1273 K

Источник: Собственное исследование.

Source: Own elaboration.

Формирование качественного защитного покрытия на поверхности бетона зависит от состава исходных композиций, физико-химического состава бетона и условий твердения. Лабораторными исследованиями установлено текучесть исходной композиции (30-34 с по ВЗ- 4) и сухого остатка (84-79 масс. %). Определены микротвердость (217,1-260,5 МПа), что достигается при его выдерживании 24 ч при температуре 20 °С и покрывную способность (240-270 г/м²) при толщине нанесения 0,4-0,6 мм.

Все разработанные составы защитных покрытий обладают высокой прочностью на удар (4,5-5,0 Дж) и прочностью на изгиб (1-2 мм).

Ускоренными исследованиями определения атмосфероустойчивости защитных покрытий доказано их высокую изолирующую способность. Краевой угол смачивания покрытий составляет больше 90 градусов, а водопоглощение защищенного бетона находится в пределах 0,18-0,58 масс.%, что в 10-25 раза меньше исходного.

5. Выводы

Таким образом, путем экспериментальных исследований определено огнезащитную способность наполненных кремнийорганических покрытий для бетона, подтверждена правильность выбора составов огнезащитных покрытий, которые характеризуются отличными показателями эффективности огнезащиты для бетонных строительных конструкций, а именно:

Огнезащитная эффективность разработанного вещества на основе кремнийорганической связки, наполненной алюминия, кремния и магния оксидами, основывается на создании вспученного термоизоляционного слоя. Огнезащитный слой образуется на поверхности бетонной конструкции при температуре 473-773 К. Благодаря низкой теплопроводности пористый термоизоляционный слой покрытия предотвращает быстрое прогревание защищенной строительной конструкции, тем самым повышает ее огнестойкость.

Составы огнезащитных покрытий № 3 и № 4 характеризуются наиболее высокими линейными коэффициентами вспучивания и наиболее низкими значениями коэффициентов теплопроводности, что, в свою очередь является важным показателем эффективности огнезащиты для бетонных строительных конструкций. Лучшие характеристики имеет огнезащитное вещество состава № 3, для которого $\lambda = 0,058$ Вт / м·К та $K_f = 12,3$.

Литература

1. Milovanov A.F., *Stoykost' zhelezobetonnykh konstruksiy pri pozhare*, Stroyizdat, Moscow 1998, p. 304.
2. Orlovs'kij Yu.T., Shnal' T.M., *Pidvishennja vognestijkosti konstrukcij budivel' ta sporud vognazahisnimi pokrittjami*, „Pozhezhna Bezpeka”, Issue 2, 2002, pp. 50-55.
3. Krivtsov Yu.V., Lamkin O.B., Rubtsov V.V., Gabdulin R.SH., *Tonkosloynaya ogneshashchita betona*, „Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo”, Issue 6, 2006, pp. 42-44.
4. Yemchenko I.V., M.M. Givljud, *Shljahi reguljuvannja vlastivostej oksidnoї keramiki, oderzhanōi iz napovnenih*

silicijorganicznych kompozycji, „Visnik Donec’kogo derzhavnogo universitetu ekonomiki i torgivli im. M. Tugaj – Baranovs’kogo, Issue 1, 2006, pp. 148-152.

5. Yakovchuk R.S., Parkhomenko R.V., Kotsiyy Ya.Y., Kordiyeritovyi vognetrivkiy zakhisniy pokrittya dlya betonikh konstruktsiyy, „Pozhezhna bezpeka”, Issue 21, 2012, pp. 195-200.
6. Zahyst vid pozhezhi. Vognezahysne obroblyannja budivel’nyh konstrukcij. Zagal’ni vymogy ta metody kontroljuvannja: DSTU-N-P B V.1.1–29:2010, [Chynnyy vid 2011-11-01], Minregionbud Ukrayiny, 2011, p. 9 (Nacional’nyj standart Ukrayiny).

Яковчук Роман Святославович – старший преподаватель кафедры надзорно-профилактической деятельности, Львовский государственный университет безопасности жизнедеятельности.

Веселивский Роман Богданович – доцент кафедры гражданской защиты и компьютерного моделирования екогеофизических процессов, кандидат технических наук, Львовский государственный университет безопасности жизнедеятельности.