

МЕТОД ОЦЕНКИ ТОКСИЧНОСТИ ПРОДУКТОВ ГОРЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО СОСТАВУ ГАЗОВОЙ СМЕСИ

Соколик Г.А., к.х.н., Лейнова С.Л., к.х.н., Свиршевский С.Ф., Рубинчик С.Я.,
Клевченя Д.И., Гулевич А.Л., д.х.н., профессор
Белорусский государственный университет

e-mail: sokolikga@mail.ru

Разработан и апробирован расчетно-экспериментальный метод оценки токсичности продуктов горения по составу газовой смеси для материалов, изготовленных на основе целлюлозы, поликарбонатов, полиэтилена, полистирола, полипропилена, поливинилацетата, полиуретана, полиамида, полиамидных и эпоксидных смол. Разработанный метод согласуется с требованиями международных стандартов и позволяет минимизировать расходование подопытных животных при существенном сокращении сроков исследований.

The computational-experimental method for assessment the toxicity of combustion products on the composition of the gas phase for materials produced by cellulose, polycarbonate, polyethylene, polystyrene, polypropylene, polyvinyl acetate, polyurethane, polyamide, polyamide and epoxy resins was developed and tested. The developed method agrees with requirements of international standards and allows minimizing the expenditure of experimental animals with substantial reduction of terms of research.

(Поступила в редакцию 12 октября 2011 г.)

ВВЕДЕНИЕ

Материалы, используемые при строительстве и отделке жилых и административных зданий, спортивных сооружений, железнодорожных вагонов и вагонов метрополитена, аэропортов, учебных учреждений и других объектов массового пользования должны соответствовать определенным требованиям пожарной безопасности, одним из важнейших параметров которых является токсичность продуктов горения.

Вопросы уменьшения опасности отравления людей продуктами горения занимают одно из центральных мест при обеспечении пожарной безопасности в случае возникновения чрезвычайных ситуаций. На строительном рынке появилось огромное количество полимерных материалов, изготовленных на различной основе, поэтому контроль используемых материалов должен осуществляться непрерывно, чтобы не допустить применения продукции, не соответствующей нормам пожарной безопасности.

Для полимерных материалов контроль токсичности продуктов горения предусмотрен различными национальными стандартами Республики Беларусь, в том числе: СНБ 2.02.01-98 (Пожарно-техническая классификация зданий, строительных конструкций и материалов), СТБ 1338-2002 (Пенопласты жесткие полиуретановые и полиизоциануратные), СТБ 1437-2004 (Плиты пенополистирольные теплоизоляционные), СТБ 1466-2004 (Композиции защитные модифицированные эпоксидные), СТБ 1102-2005 (Плиты теплоизоляционные пенополистиролбетонные), СТБ 1806-2007 (Панели металлические трехслойные с утеплителем из пенополистирольных панелей) и др.

Современный уровень развития научных знаний позволяет четко выделить два методологических подхода к оценке токсичности продуктов горения: с использованием подопытных животных и по составу газовой смеси, образующейся при термическом разложении материалов.

При определении показателя токсичности продуктов горения с использованием подопытных животных (биологический метод) суммарный токсический эффект продуктов горе-

ния оценивается по результату их непосредственного воздействия на животных. Биологический метод, описанный в ГОСТ 12.1.044-89 [1], применяется на сегодняшний день на территории Республики Беларусь, в России, Украине и некоторых других странах СНГ. Необходимость массового расходования подопытных животных (мышей) в данном методе противоречит современным требованиям, изложенным в международном стандарте ISO 13344:1996 [2], а длительные сроки проведения эксперимента (около 3 недель) не всегда позволяют оперативно получить информацию о токсичности продуктов горения материалов, что сдерживает их поступление как на внутренний, так и на внешний рынки.

Биологический метод определения показателя токсичности продуктов горения заключается в выявлении зависимости летального эффекта газообразных продуктов горения от массы материала, отнесенной к единице внутреннего объема установки. Полученные экспериментальные результаты используются для расчета показателя токсичности (H_{CL50}), который представляет собой отношение массы анализируемого образца к объему замкнутого пространства, в котором образующиеся при горении газообразные продукты вызывают гибель 50 % подопытных животных (погибших во время экспозиции и в течение последующих 2 недель) [1]. Чем выше значение показателя токсичности, тем к менее опасным по токсичности продуктов горения могут быть отнесены испытываемые материалы. Так, к малоопасным (группа токсичности T1) относятся материалы при показателе токсичности продуктов горения $H_{CL50} > 120 \text{ г/м}^3$, к умеренно-опасным (группа токсичности T2) – при $40 \text{ г/м}^3 < H_{CL50} < 120 \text{ г/м}^3$, к высокоопасным (группа токсичности T3) – при $13 \text{ г/м}^3 < H_{CL50} < 40 \text{ г/м}^3$, к чрезвычайно опасным (группа токсичности T4) – при $H_{CL50} < 13 \text{ г/м}^3$.

При определении токсичности продуктов горения веществ и материалов по составу газовой смеси (расчетно-экспериментальный метод) интерпретация полученных результатов проводится по расчетным моделям, которые учитывают фракционную эффективную дозу (FED), отражающую взаимосвязь между смертностью животных и содержанием в газовой фазе основных токсичных и биологически активных компонентов. Расчетно-экспериментальный метод описан в международном стандарте [2] и активно разрабатывается для практического использования в России [3, 4] и Украине [5, 6]. В указанных материалах биологическая составляющая испытаний отводится на второй план, а анализ состава газообразных продуктов горения приобретает первоочередную значимость.

В международном стандарте [2] представлены расчетно-экспериментальный метод оценки токсичности продуктов горения по составу газовой смеси и биологический метод с использованием крыс в качестве подопытных животных. В документе отмечено, что в биологическом методе могут быть задействованы и мыши, но при этом в расчетных моделях все используемые численные коэффициенты также должны быть получены в экспериментах с мышами. Однако, такие данные в международных документах [7, 8] не приведены в необходимом объеме, а в стандарте [2] вообще отсутствуют. Кроме того, в стандарте не указано, какие применяются критерии проверки правильности полученных расчетных значений H_{CL50} и, таким образом, не регламентировано в каких случаях для определения показателя токсичности продуктов горения необходимо применять биологический метод. Установка, предназначенная для проведения испытаний, в документах Международной организации по стандартизации [2, 9] охарактеризована весьма схематично. Отмечено, что все материалы должны исследоваться в условиях термоокислительного разложения при плотности падающего теплового потока $50 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}$ в течение 30 минут. При проведении испытаний по определению токсичности продуктов горения расчетно-экспериментальным методом предлагается в обязательном порядке определять в газовой смеси содержание CO , CO_2 и O_2 , а при необходимости – и таких веществ, как HCN , HCl , HBr , HF , N_xO_y , SO_2 , акролеин и формальдегид. Несмотря на то, что анализ состава продуктов горения выходит на первый план, методики определения указанных газов, описанные в документах [2, 10], не могут быть использованы без доработки. Все вышесказанное не позволяет применять на практике расчетно-экспериментальный метод, описанный в международном стандарте [2], для определения токсичности продуктов горения по составу газовой смеси без проведения дополнительных исследований и соответствующей адаптации.

В проекте документа, разработанного в России, так же, как и в [2], описаны расчетно-экспериментальный и биологический методы определения показателя токсичности продуктов горения полимерных материалов [4], но при этом в качестве подопытных животных рекомендуется использовать мышей. В проекте документа регламентировано проведение контрольного эксперимента с подопытными животными (мышьями) и четко отмечено, в каких случаях обязательным является применение биологического метода. Расчетно-экспериментальный метод, планируемый для использования в России, во многом повторяет требования, предъявляемые к испытательному оборудованию и порядку проведения испытаний образцов материалов, изложенных в [1]. Однако этот метод предусматривает два режима испытания: при плотностях теплового потока $25 \text{ кВт}\cdot\text{м}^{-2}$ и $40 \text{ кВт}\cdot\text{м}^{-2}$, при этом время действия электронагревательного излучения не должно превышать 20 минут, а общая продолжительность испытания образцов – составлять 30 минут, в течение которых устанавливается концентрация контролируемых газов. Методики определения этих газов в российском методе не описаны.

Метод, используемый в настоящее время на территории Украины для определения токсичности продуктов горения [6], представляет собой биологический метод [1], дополненный методиками определения содержания 8 токсичных компонентов газовой фазы (акролеина, аммиака, хлористого водорода, оксидов азота, оксида углерода, фенола, формальдегида). Оценку FED предлагается делать по одной из моделей, приведенных в [2]. Однако выборка контролируемых в [6] токсичных компонентов не соответствует перечню газов, рекомендуемых в международном стандарте [2], поэтому не понятно, как можно использовать полученные результаты для оценки расчетного значения показателя токсичности.

Для разработки расчетно-экспериментального метода с целью его дальнейшего применения на территории Республики Беларусь было необходимо:

- создать базу данных, содержащую информацию о параметрах токсичности, полученных биологическим методом, и о количественном составе образующейся при горении материалов газовой смеси;
- установить взаимосвязь между параметрами токсичности и составом газовой фазы (при использовании мышей в качестве подопытных животных);
- разработать расчетную модель для определения FED, отражающей взаимосвязь между смертностью животных и содержанием в газовой фазе основных токсичных и биологически активных компонентов;
- создать методики оценки H_{CL50} для различных групп материалов;
- провести апробацию разработанных методик.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для решения поставленных задач была изготовлена установка, позволяющая одновременно определять токсичность продуктов горения биологическим методом и анализировать состав газовой смеси, образующейся при термическом разложении материалов. Состав газовой смеси определялся в соответствии с разработанной в НИЛ прикладных проблем токсичности продуктов горения БГУ методикой выполнения измерений МВИ 3763-2011 [11].

В НИЛ было проанализировано 223 материала с различной основой. Для того, чтобы систематизировать работу по созданию и апробации расчетно-экспериментального метода, для испытаний были отобраны и объединены в группы изготовленные разными производителями материалы на основе целлюлозы, поликарбонатов, полиэтилена, полистирола, полипропилена, полиуретана, полиамида, поливинилацетата, полиамидных и эпоксидных смол.

Все испытания в соответствии с требованиями [1] проводились в режиме максимальной токсичности. Образцы материалов подвергались в камере сгорания нагреву в двух режимах: при плотностях падающего теплового потока $18 \text{ кВт}\cdot\text{м}^{-2}$ и $40 \text{ кВт}\cdot\text{м}^{-2}$. Критерием выбора режима испытаний служило содержание CO в газовой смеси, а также соотношение концентраций CO_2/CO (чем больше это соотношение, тем менее токсичный режим проведения испытаний). Время разложения образцов соответствовало времени достижения макси-

мального значения концентрации CO в экспозиционной камере. Концентрации анализируемых газов контролировались в течение 30 минут.

Результаты, полученные при исследовании состава газовой фазы, образующейся при термическом разложении материалов, согласуются с литературными данными и показывают, что состав продуктов термической деструкции материалов определяется не только основным (базовым) веществом, но и многочисленными добавками и примесями, содержащимися в производимом материале [12, 13]. На основании полученных экспериментальных данных о составе и токсичности газовой фазы были проанализированы и апробированы модели, описанные в литературе и предлагаемые для оценки FED [2–6], учтены их достоинства и недостатки [14]. Далее была разработана собственная модель, в которой при определении показателя токсичности продуктов горения расчетно-экспериментальным методом учитывается в образующейся газовой смеси содержание CO, CO₂, HCN, N_xO_y, SO₂, HCl, HBr, HF, формальдегида и акролеина, а также концентрация O₂, и тот факт, что токсичность CO изменяется по мере возрастания содержания в газовой смеси CO₂. Закономерность такого изменения для мышей была установлена авторами экспериментально и описана математически [14, 15].

При выявлении зависимости токсического эффекта CO от содержания в газовой смеси CO₂ в качестве исходного было принято предположение, что для мышей так же, как и для крыс [2, 8], она линейна, т. е.

$$[\text{CO}_2] = a_m [\text{CO}] + b_m, \quad (1)$$

где [CO], [CO₂] – концентрации соответствующих газов в объеме замкнутого пространства, когда гибнет 50 % подопытных животных (мышей), ppm;

a_m, b_m – коэффициенты, отражающие токсический эффект CO, который меняется в зависимости от содержания в газовой смеси CO₂ (при использовании мышей).

Для установления величины коэффициентов a_m и b_m было проведено 11 серий испытаний, в которых исследовалось, как изменяется летальность мышей в смеси CO и CO₂ в зависимости от содержания в ней этих газов. В каждой серии испытаний концентрация CO была фиксирована, а концентрация CO₂ изменялась таким образом, чтобы смертность животных при совместном действии CO и CO₂ в каждом испытании (при отсутствии других токсических компонентов) составляла 50 %. На рис. показано, как изменяется величина концентрации CO, при которой имеет место 50 %-ная смертность подопытных мышей от содержания в газовой смеси CO₂.

Из представленных на рисунке данных видно, что чем выше содержание в газовой смеси CO₂, тем при меньшей концентрации CO наблюдается 50 % смертность животных.

Предлагаемая модель для расчета FED при оценке токсичности продуктов горения по количественному составу газовой смеси имеет следующий вид:

$$FED = \frac{a_m [\text{CO}]}{[\text{CO}_2] - b_m} + \frac{21 - [\text{O}_2]}{21 - H_{CL50, \text{O}_2}} + \frac{[\text{HCN}]}{H_{CL50, \text{HCN}}} + \frac{[\text{HCl}]}{H_{CL50, \text{HCl}}} + \frac{[\text{HBr}]}{H_{CL50, \text{HBr}}} + \frac{[\text{HF}]}{H_{CL50, \text{HF}}} + \frac{[\text{A}][\text{SO}_2]}{H_{CL50, \text{SO}_2, \text{A}}} + \frac{[\text{N}_x\text{O}_y]}{H_{CL50, \text{N}_x\text{O}_y}} + \frac{[\text{F}]}{H_{CL50}} + \frac{[\text{C}]}{H_{CL}}, \quad (2)$$

где [CO], [HCN], [HCl], [HBr], [HF], [SO₂], [N_xO_y], [F] (формальдегид), [A] (акролеин) – концентрации соответствующих компонентов газовой смеси в объеме замкнутого пространства, ppm;

H_{CL50i} – концентрация соответствующего компонента газовой смеси, вызывающая 50 %-ную смертность животных, ppm (или % об.);

[CO₂], [O₂] – концентрации соответствующих компонентов газовой смеси в объеме замкнутого пространства, % об.;

a_m, b_m – коэффициенты, отражающие изменение токсического эффекта CO в зависимости от концентрации CO₂ в газовой смеси (при использовании в качестве подопытных животных мышей $a_m = -21,05, b_m = 134864$).

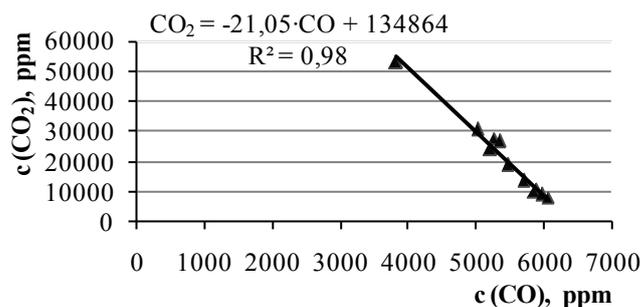


Рисунок – Зависимость величины концентрации CO, вызывающей 50 %-ную смертность подопытных животных (мышей), от содержания в газовой смеси CO₂

Для дальнейшей работы по созданию расчетно-экспериментального метода разработанная модель, а также экспериментальные данные, полученные при исследовании токсичности и состава образующейся при горении материалов газовой фазы [16], были использованы для создания 9 методик. Каждая из методик была предназначена для определения токсичности продуктов горения определенной группы материалов (изготовленных на основе целлюлозы, поликарбонатов, полиэтилена, полистирола, полипропилена, полиуретана, полиамида, поливинилацетата, полиамидных и эпоксидных смол). Наличие отдельных методик для каждой группы материалов позволило провести апробацию этих методик, осуществить их усовершенствование и корректировку. В каждой из методик с учетом особенностей каждого типа материалов были конкретизированы условия проведения испытаний: указаны рекомендуемые начальные значения исходной массы образцов и объема экспозиционной камеры, а также указаны временные параметры разложения материалов при двух плотностях падающего теплового потока, что существенно сократило общее время, затрачиваемое на проведение испытаний.

Для оптимизации работ по практическому использованию разработанных методик для каждой группы материалов на их основе был создан расчетно-экспериментальный метод, предназначенный для расчетного определения показателя токсичности продуктов горения по составу газовой смеси, образующейся при термическом разложении указанных материалов. Разработанный метод положен в основу проекта СТБ «Расчетно-экспериментальный метод определения показателя токсичности продуктов горения веществ и материалов различного состава». Метод адаптирован к применению на территории Республики Беларусь: измерительное оборудование, рекомендованное для испытаний, внесено в реестр Республики Беларусь, методика определения содержания основных токсичных и биологически активных газов, образующихся в газовой смеси, соответствует требованиям, предъявляемым к методикам выполнения измерений, и допущена к применению на территории Республики Беларусь.

Расчетно-экспериментальный метод, представленный в проекте СТБ, так же, как и метод, разработанный в России [4], устанавливает процедуру проведения контрольного эксперимента для каждого материала с использованием подопытных животных (мышей): контрольный эксперимент заключается в испытании образца материала, величина относительной массы которого ($m \cdot v^{-3}$) соответствует среднему расчетному значению H_{CL50} ($г \cdot м^{-3}$). В созданном методе клетку с подопытными животными рекомендуется помещать в предкамеру по достижении максимальной концентрации CO в газовой фазе, образующейся при термическом разложении материалов. Предусмотрено, что в случае получения отрицательного результата (летальные исходы в группе подопытных животных не зарегистрированы или, напротив, отмечена гибель 100 % животных) необходимо использовать биологический метод, при получении сомнительного результата (летальность в группе подопытных животных составляет 10 % или 90 %) контрольный эксперимент должен быть проведен повторно.

При определении показателя токсичности расчетно-экспериментальным методом все испытания должны проводиться в режиме максимальной токсичности. При этом образцы материала подвергаются в камере сгорания нагреву в двух режимах: при плотностях падающего теплового потока $18 \text{ кВт}\cdot\text{м}^{-2}$ и $40 \text{ кВт}\cdot\text{м}^{-2}$. Критерием выбора требуемого режима испытаний является содержание в газовой смеси токсичных газов [1], а также соотношение концентраций CO_2/CO . В созданном методе, представленном в проекте СТБ, приводится подробное описание последовательности операций, указано, как вычисляются средние значения концентраций анализируемых компонентов газовой смеси, образующейся при проведении испытаний. Отмечено, что концентрации анализируемых газов должны определяться в соответствии с методикой [11] и контролироваться в течение 30 минут, что соответствует времени экспозиции животных в контрольном эксперименте и в биологическом методе.

В Беларуси и России при определении показателей токсичности биологическим методом и в расчетно-экспериментальных методах (при подтверждении полученного расчетного значения) в качестве подопытных животных используются белые мыши [3, 4]. Это позволило провести апробацию как собственного, так и российского методов определения показателя токсичности продуктов горения и сопоставить полученные данные между собой и со значениями показателей токсичности, полученными биологическим методом в соответствии с [1].

Анализ результатов определения показателя токсичности разными методами показал, что группы токсичности продуктов горения, установленные биологическим методом и установленные по составу газовой смеси с использованием российского метода и метода, разработанного авторами, в большинстве случаев совпадают. В табл. показана доля совпадений групп токсичности, установленных при использовании российского и разработанного в БГУ расчетно-экспериментальных методов, с группами токсичности, определенными биологическим методом. Так, для материалов, изготовленных на основе поликарбонатов, полиэтилена, полипропилена, полиамида, наблюдалось 100 %-е совпадение групп токсичности продуктов горения, установленных биологическим методом, со значениями групп токсичности, установленных по разработанному авторами расчетно-экспериментальному методу.

Таблица – Доля совпадений групп токсичности, определенных расчетно-экспериментальными методами, с группами токсичности, установленными биологическим методом

Основа материала	Доля совпадений, %	
	Разработанный метод (РБ)	Российский метод (РФ)
Целлюлоза	68,6	74,0
Поликарбонат	100,0	100,0
Полиэтилен		78,6
Полистирол	99,0	91,8
Полипропилен	100,0	80,0
Поливинилацетат	80,0	20,0
Полиуретан	95,5	81,8
Полиамид	100,0	92,9
Полиамидные и эпоксидные смолы	95,2	61,9

Для материалов, изготовленных на основе целлюлозы, поливинилацетата, полиуретана, полиамидных и эпоксидных смол, в тех случаях, когда такого совпадения не было, при апробации как собственного, так и российского методов наблюдались увеличение группы токсичности ($T1 \rightarrow T2$ и $T2 \rightarrow T3$) и завышение класса опасности, т. е. контроль с использованием расчетно-экспериментального метода для этих материалов оказался более строгим, чем контроль с использованием биологического метода. В то же время при апробации российского метода для отдельных материалов, изготовленных на основе полиэтилена, полистирола, полипропилена, полиамида, наблюдались уменьшение группы токсичности и понижение класса опасности ($T4 \rightarrow T3$ и $T3 \rightarrow T2$).

Полученная в ходе создания расчетно-экспериментального метода информация была внесена в базу данных «Токсичность продуктов горения», которая зарегистрирована в Государственном регистре информационных ресурсов Республики Беларусь (свидетельство № 1310700525 от 10 декабря 2007 года).

ОБСУЖДЕНИЕ

Основная причина получения значений показателей токсичности разработанным методом, более близких к значениям, полученным биологическим методом, заключается, скорее всего, в различии моделей, используемых для оценки FED в разработанном и российском методах: модель, предлагаемая для расчетов в российском методе [4], не учитывает влияние содержания в смеси CO_2 на токсичность CO . Использование для расчетов модели, разработанной авторами и учитывающей это влияние, как было показано ранее [14], во многих случаях позволило получить либо такие же значения показателей токсичности, какие были получены биологическим методом, либо более низкие. Кроме того, при проведении испытаний в российском методе предлагается ограничить время нагревания материалов 20 минутами. Для некоторых материалов такого времени недостаточно для полного термического разложения и достижения режима максимальной токсичности, следствием чего является получение завышенных значений показателей. Таким образом, при использовании российского метода не всегда можно верно оценить значения показателей токсичности материалов, у которых время разложения превышает 20 минут, и получить в результате проведенных испытаний данные, свидетельствующие о меньшей токсичности продуктов их горения. Возможно, такая ситуация имела место при исследовании отдельных материалов, изготовленных на основе полиэтилена, полистирола, полипропилена, полиамида. Значения показателей токсичности для этих материалов, полученные по российскому методу, отличались от значений, полученных биологическим методом, и превышали их в 1,5–2 раза. Следствием этого явилось то, что данные материалы были охарактеризованы как менее опасные.

Контрольный эксперимент, описанный в созданном методе, необходим для подтверждения расчетного значения показателя токсичности. Особенно это важно при исследовании полимерных композитных материалов (пластиков бумажно-слоистых, панелей древесноволокнистых, панелей древесно-стружечных, винилискожи с разными покрытиями и т. д.), при термическом разложении которых в газовой фазе могут присутствовать вещества, определение которых не предусмотрено разработанным методом и не регламентировано требованиями международного стандарта [2]. Существующая принципиальная возможность несовпадений групп токсичности, установленных расчетно-экспериментальным методом, с группами токсичности, полученными биологическим методом, подтверждает необходимость обязательного проведения в расчетно-экспериментальном методе контрольного эксперимента с использованием подопытных животных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как показали результаты апробации созданного расчетно-экспериментального метода, его применение не приводит к снижению класса опасности испытываемых материалов, а, в отдельных случаях, наоборот, обеспечивает более строгий контроль, чем биологический метод. Ранее считалось, что определение токсичности продуктов горения по составу газовой смеси может привести к получению более высоких значений показателей токсичности, чем при использовании биологического метода, и, как следствие, к применению материалов, не отвечающих требованиям пожарной безопасности по токсичности продуктов горения [5]. Разработанный метод согласуется с требованиями международных стандартов и позволяет минимизировать расходование подопытных животных при существенном сокращении сроков исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Система стандартов безопасности труда. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения : ГОСТ 12.1.044-89. – Введ. 01.01.91. – М. : Изд-во стандартов, 1990. – 156 с.
2. Determination of the lethal toxic potency of fire effluents: ISO 13344:1996. – Switzerland : International Organization for Standardization, 1996. – 12 с.
3. Иличкин, В.С. Методические основы экспериментально-расчетного определения показателя токсичности продуктов горения материалов / В.С. Иличкин [и др.] // Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. – 2004. – № 4. – С. 28–32.
4. Методы определения показателя токсичности продуктов горения и дымообразующей способности строительных материалов. Руководство. – М.-СПб : ФГУ ВНИИПО МЧС России : СПбФ ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2004. – 29 с. (в печати).
5. Шафран, Л.М. Гармонизация методов оценки токсичности продуктов горения полимеров с международными требованиями / Л.М. Шафран, И.А. Харченко // Сучасні проблеми токсикології. – 2003. – № 3. – С. 10–15.
6. Визначення та гігієнічна оцінка показників токсичності продуктів горіння полімерних матеріалів: МВ 8.8.2.4-127-2006. – Введ. 07.06.06. – Одесса, 2006. – 128 с.
7. Toxicity testing of fire effluents: ISO/TR 9122-2:1990. – Part 2: Guidelines for biological assays to determine the acute inhalation toxicity of fire effluents (basic principles, criteria and methodology). – Switzerland: International Organization for Standardization, 1990. – 11 с.
8. Toxicity testing of fire effluents: ISO/TR 9122-5:1993 (E). – Part 5: Prediction of toxic effects of fire effluents. – Switzerland: International Organization for Standardization, 1993. – 16 с.
9. Toxicity testing of fire effluents: ISO/TR 9122-4:1993 (E). – Part 4: The fire model (furnaces and combustion apparatus used in small-scale testing). – Switzerland: International Organization for Standardization, 1993. – 14 с.
10. Toxicity testing of fire effluents: ISO/TR 9122-3:1993. – Part 3: Methods for the analysis of gases and vapours in fire effluents. – Switzerland: International Organization for Standardization, 1993. – 34 с.
11. Методика определения содержания CO, CO₂, O₂, NO, NO₂, SO₂, HCN, формальдегида, акролеина, HCl, HBr, HF в газовой смеси, образующейся при горении веществ и материалов: МВИ 3763-2011. – Введ. 30.03.11. – Минск: Белорусский государственный институт метрологии, 2011. – 161 с.
12. Кодолов, В.И. Замедлители горения полимерных материалов / В.И. Кодолов. – М. : Химия, 1980. – 274 с.
13. Воробьев, В.А. Горючесть полимерных строительных материалов / В.А. Воробьев, Р.А. Адрианов, В.А. Ушков. – М. : Стройиздат, 1978. – 224 с.
14. Соколик, Г.А. Разработка и апробация моделей для расчета показателя токсичности продуктов горения, образующихся при термическом разложении материалов различного типа / Г.А. Соколик [и др.] // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2011. – № 1 (13). – С. 45–52.
15. Свирщевский, С.Ф. Использование расчетных моделей для определения токсичности газовой смеси, образующейся при горении полимерных материалов. // Актуальные проблемы естественных наук : материалы Междунар. заоч. науч.-практ. конференции, Тамбов, 2011 г. / М-во обр. и науки РФ, ГОУВПО «Тамб. гос. ун-т им. Г.Р. Державина» ; редкол. : А.В. Гулин [и др.]. – Тамбов : Изд. дом ТГУ им. Г.Р.Державина, 2011. – С. 92–97.
16. Соколик, Г.А. Состав и токсичность газовой фазы, образующейся при термическом разложении материалов, изготовленных на различной основе / Г.А. Соколик [и др.] // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2009. – № 2 (26). – С. 447–454.