

УДК 614.8

## **ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ЦИФРОВОГО СПОСОБА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОЖАРООПАСНЫХ СВОЙСТВ ПРОДУКТОВ НЕФТЕПЕРЕРАБОТКИ**

**Д.С. Королев, кандидат технических наук.**

**Воронежский государственный технический университет.**

**А.В. Вытовтов, кандидат технических наук.**

**Воронежский институт повышения квалификации сотрудников ГПС МЧС России**

Цифровое развитие нефтегазовой отрасли Российской Федерации требует и цифровых подходов в обеспечении пожарной безопасности, к которым относится способ прогнозирования пожароопасных свойств продуктов нефтепереработки на основе молекулярных дескрипторов и искусственных нейронных сетей. О данном способе достаточно детально рассказывалось в статье «Применение «deep learning» при прогнозировании пожароопасных показателей кислородсодержащих органических соединений» [1], а также показан процесс прогнозирования температуры вспышки для ряда органических соединений (предельные кетоны и альдегиды, сложные эфиры масляной кислоты). Показана верификация данных, рассчитана средняя относительная погрешность.

Однако для определения эффективности предлагаемого способа и полного анализа полученных результатов проводили регрессионный анализ. Было рассчитано девять основных параметров, среди которых ошибка аппроксимации, равная 1,47 %, и выведено уравнение регрессии, получены удовлетворительные результаты.

*Ключевые слова:* цифровой способ, молекулярные дескрипторы, пожарная безопасность, свойства веществ, искусственные нейронные сети, анализ

## **EFFICIENCY OF APPLICATION OF THE DIGITAL METHOD FOR FORECASTING THE FIRE-HAZARDOUS PROPERTIES OF REFINING PRODUCTS**

**D.S. Korolev. Voronezh state technical university.**

**A.V. Vytovtov. Voronezh institute for advanced studies of State fire service of EMERCOM of Russia**

The digital development of the oil and gas industry in the Russian Federation also requires digital approaches to ensuring fire safety, which include a method for predicting the fire hazardous properties of oil refined products based on molecular descriptors and artificial neural networks. This method was described in sufficient detail in the article «Application of " deep learning "in predicting fire hazard indicators of oxygen-containing organic compounds»[1], and the process of predicting the flash point for a number of organic compounds (limiting ketones and aldehydes, butyric acid esters) is shown. Verification of the data is shown, the average relative error is calculated.

However, to determine the effectiveness of the proposed method and complete analysis of the results obtained, a regression analysis was performed. Nine main parameters were calculated, among which the approximation error, was 1,47 %, and the regression equation was derived, satisfactory results were obtained.

*Keywords:* digital way, molecular descriptors, fire safety, properties of substances, artificial neural networks, analysis

Для развития прорывных инноваций нефтегазовые компании обращаются к новым моделям управления [2]:

- сотрудничество с внешними партнерами;
- дизайн-мышление (разработка новых веществ и материалов, ориентированных на потребности людей и смежных производств);
- корпоративные венчурные фонды (инвестирование в инновационные технологии сторонними организациями);
- бизнес-инкубаторы.

Таким образом, крупные нефтегазодобывающие предприятия активно взаимодействуют с внешней средой в процессе инновационной деятельности для последующего обмена технологиями, знаниями, профессиональными компетенциями, поэтому неудивительно, что цифровизация находит все большее применение в нефтегазовом секторе.

Ведущие нефтяные компании ощутили на себе эффект от применения цифровых технологий, которые приносят им новые конкурентные преимущества. Так, например, применение периодического сейсмониторинга, в ходе которого осуществляются сейсмические исследования месторождения, обеспечивает добывающую компанию информацией о смещении пласта, показывая, где лучше пробурить новые скважины для добычи, а также повышается коэффициент нефтеотдачи [3].

Внедрение цифровых технологий охватывает не только производственную деятельность, но и корпоративные функции, что позволяет автоматизировать процессы передачи и обработки информации, ликвидировать ручной труд.

Одна из ведущих нефтяных компаний «Газпром нефть» анонсировала строительство самого современного комплекса по производству высокотехнологичных катализаторов, новых продуктов при нефтепереработке. Производственные мощности строящегося завода должны решить проблему импортозамещения и вывести Российскую Федерацию на новый уровень поставок за границу бензина, дизельного топлива. Планируется проводить гидрокрекинг (глубокую переработку нефти) по новым технологиям, разработанным совместно с ведущими российскими научно-исследовательскими институтами, тем самым получая новые синтезированные вещества и материалы [4].

Не стоит забывать, что нефтегазовая отрасль является наиболее важной для бюджета Российской Федерации, поскольку более 50 % его формируется за счет продажи углеводородов за рубеж. На рисунке представлена диаграмма налоговых отчислений.

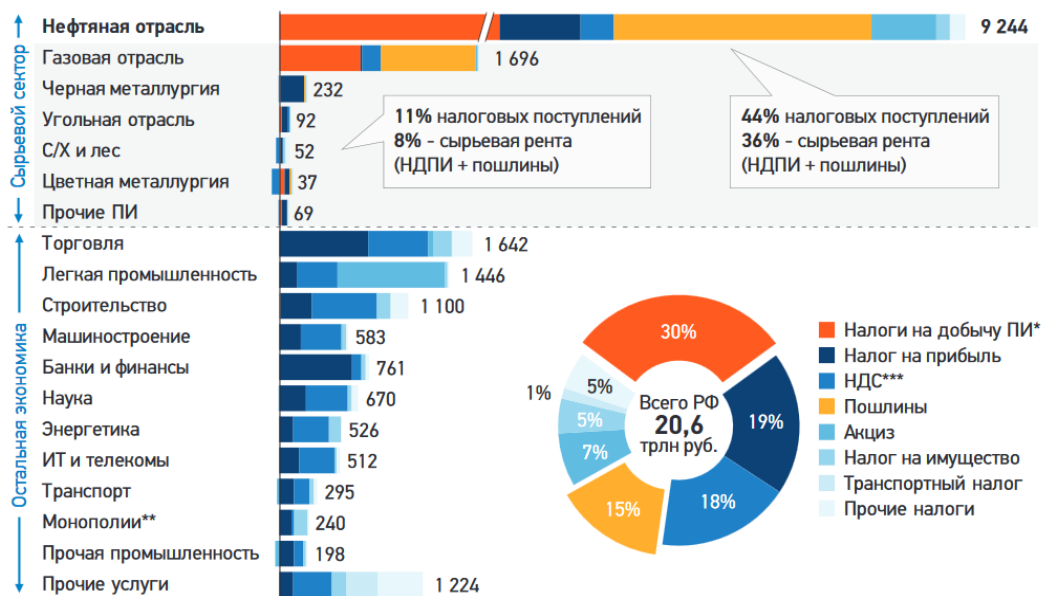
Также рассматриваемая отрасль является особо опасной с точки зрения пожарной безопасности, где сконцентрировано большое количество взрывопожароопасных веществ и материалов. Согласно статистическим данным, только за последние пять лет было зарегистрировано свыше 300 пожаров на подобных объектах. Основными причинами являлись [5–9]:

- нарушение правил техники безопасности (33 %);
- некачественный ремонт и монтаж оборудования (22 %);
- некачественная молниезащита (13 %);
- нарушение правил технологического регламента (11 %);
- износ оборудования (8 %);
- разное (13 %).

Таким образом, пожары в нефтегазовом секторе в основном имеют локальный характер и характеризуются высоким социальным пожарным риском, что может приводить к катастрофическим последствиям.

Поэтому в целях обеспечения пожарной безопасности объектов защиты (установлении требований пожарной безопасности к зданиям, сооружениям и т.д.) нефтегазовой отрасли Федеральный закон от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» устанавливает обязательное требование о необходимости классификации веществ и материалов по пожарной опасности,

используемых на предприятиях, определении их физико-химических свойств для разработки систем обеспечения пожарной безопасности [10].



**Рис. Распределение налоговых отчислений по секторам экономики (ПИ – полезные ископаемые; НДПИ – налог на добычу полезных ископаемых; ИТ – информационные технологии; НДС – налог на добавочную стоимость)**

В статьях [11–13] неоднократно поднимался вопрос о многообразии пожароопасных веществ и материалов, требующих детального изучения, а также основные причины, по которым данное направление актуально. В качестве решения проблемы прогнозирования пожароопасных свойств продуктов нефтепереработки активно применялся способ прогнозирования свойств кислородсодержащих веществ на основе молекулярных дескрипторов и искусственных нейронных сетей, который хорошо себя зарекомендовал.

Отсюда целью настоящей работы является проведение сравнительного анализа спрогнозированных значений, представленных в работе [1], и значений, указанных в справочной и нормативной литературе. В основе анализа лежит гипотеза о том, что связь между спрогнозированными значениями  $X$  и  $Y$  носит линейный характер и имеет вид (1), а оценочное уравнение регрессии имеет вид (2):

$$y = bx + a; \tag{1}$$

$$y = bx + a + \varepsilon, \tag{2}$$

где  $\varepsilon$  – некоторая ошибка;  $a$  и  $b$  – параметры оценки  $\alpha$  и  $\beta$  регрессионной модели.

Некоторая ошибка ( $\varepsilon_i$ ) для каждого значения случайны ( $i$ ) и их параметры неизвестны, следовательно:

- $X_i$  и  $Y_i$  можно рассчитать только после оценки параметров  $\alpha$  и  $\beta$ ;
- параметры  $\alpha$  и  $\beta$  – это не что иное, как численные величины  $a$  и  $b$ , которые соответствуют случайной выборке и находятся при помощи метода наименьших квадратов (МНК).

МНК представляет собой эффективную оценку параметров уравнения регрессии при условии, что имеются определенные условия относительно ошибки ( $\varepsilon$ ) и независимой переменной ( $x$ ). Критерии МНК можно представить в виде:

$$S = \sum (y_i - y \cdot i) \cdot 2 \rightarrow \min .$$

Система нормальных уравнений:

$$a \cdot n + b \cdot \sum x = \sum y;$$

$$a \cdot \sum x + b \cdot \sum x^2 = \sum y \cdot x.$$

Для определения основных параметров регрессии необходимо составить сводную таблицу с расчетными показателями. Ранее было отмечено, что основными параметрами будут являться спрогнозированные значения показателей пожаровзрывоопасности продуктов нефтепереработки [1] и значения [14, 15], представленные в справочной и нормативной литературе (табл. 1).

Таблица 1. Основные расчетные показатели

Вещество	T <sub>всп</sub> , °C		x <sup>2</sup>	y <sup>2</sup>	x·y
	Прогноз (x)	Справочная (y)			
Предельные альдегиды					
2-Фенилпропаналь	70	70	4900	4900	4900
2-Метилбензальдегид	80	79	6400	6241	6320
2,5-Диметилбензальдегид	90	89	8100	7921	8010
4-Этилбензальдегид	85	83	7225	6889	7055
2,6-Диметилбензальдегид	98	97	9604	9409	9506
3,5-Диметилбензальдегид	95	94	9025	8836	8930
2,3-Диметилбензальдегид	102	101,7	10404	10342,89	10373,4
4-Бутилбензальдегид	99	100	9801	10000	9900
2,4,6-Триметилбензальдегид	101	102	10201	10404	10302
2,4,5-Триметилбензальдегид	105	111	11025	12321	11655
ИТОГО:	925	926,7	86685	87263,89	86951,4

Используя значения, представленные в табл. 1, система уравнений примет вид (3) и (4), а если представленную систему уравнений решить, то найдем параметры а и b:

$$\begin{aligned} 10 \cdot a + 925 \cdot b &= 926,7 \rightarrow \cdot(-92,5) \\ 925 \cdot a + 86685 \cdot b &= 86951,4 \rightarrow \cdot(-92,5) \\ -925 \cdot a - 85562,5 \cdot b &= -85719,75 \end{aligned} \quad (3)$$

$$925 \cdot a + 86685 \cdot b = 86951,4$$

$$1122,5 \cdot b = 1231,65$$

$$b = 1,0972$$

$$a = 10 \cdot a + 925 \cdot 1,0972 = 926,7 \quad (4)$$

$$a = 10 \cdot a = -88,245$$

$$a = -8,8245$$

Таким образом, коэффициенты регрессии b=1,0972, a=-8,8245 являются оценкой теоретических коэффициентов β, а уравнение регрессии показывает общую тенденцию в поведении рассматриваемых переменных и примет вид:

$$y = 1,0972 x - 8,8245.$$

Анализируя коэффициент регрессии  $b=1,0972$ , можно отметить, что он показывает прямую связь между  $a$  и  $b$ , а также среднее отклонение конечного показателя с повышением или понижением величины ( $x$ ) на значение равное  $1,0972$ , коэффициент регрессии  $a=-8,825$  предсказывает прогнозируемый уровень ( $y$ ), при условии, если  $x=0$  находится близко с выборочными значениями.

Если  $x=0$  расположено далеко от значения ( $x$ ), то прямая интерпретация, скорее всего, приведет к ошибочным результатам, причем не важно, как линия регрессии будет описывать анализируемые значения табл. 1. Определим основные параметры уравнения регрессии и представим их в виде сводной табл. 2.

Таблица 2. Значения основных параметров анализа

№ п/п	Параметр регрессии	Расчетные формулы	Результат
1	Выборочные средние	$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} = \frac{925}{10}$	92,5
		$\bar{y} = \frac{\sum y_i}{n} = \frac{926,7}{10}$	92,67
		$\overline{xy} = \frac{\sum x_i y_i}{n} = \frac{86951,4}{10}$	8695,14
2	Выборочные дисперсии	$S^2(x) = \frac{\sum x_i^2}{n} - \bar{x}^2 = \frac{86685}{10} - (92,5)^2$	112,25
		$S^2(y) = \frac{\sum y_i^2}{n} - \bar{y}^2 = \frac{87263,89}{10} - (92,67)^2$	138,66
3	Среднеквадратичное отклонение	$S(x) = \sqrt{S^2(x)} = \sqrt{112,25}$	10,595
		$S(y) = \sqrt{S^2(y)} = \sqrt{138,66}$	11,775
4	Коэффициент корреляции	$b = \frac{\bar{x} \cdot \bar{y} - x \cdot y}{S^2(x)} = \frac{8695,14 - 92,5 \cdot 92,67}{112,25}$	1,0972
		$a = \bar{y} - b \cdot \bar{x} = 92,67 - 1,0972 \cdot 92,5$	-8,8245
5	Ковариация	$\text{cov} = (x, y) = \bar{x} \cdot \bar{y} - x \cdot y = 8695,14 - 92,5 \cdot 92,67$	123,16
6	Коэффициент линейной парной корреляции	$r_{x,y} = b \frac{S(x)}{S(y)} = 1,0972 \cdot \frac{10,595}{11,775}$	0,987
7	Коэффициент эластичности	$E = \frac{\partial yx}{\partial x y} = b \frac{\bar{x}}{\bar{y}} = 1,0972 \cdot \frac{92,5}{92,67}$	1,095
8	Бетта-коэффициент	$\beta_j = b_j \frac{S(x)}{S(y)} = 1,0972 \cdot \frac{10,595}{11,775}$	0,987
9	Ошибка аппроксимации	$\bar{A} = \frac{\sum  y_{i-1} - y_i  \div y_i}{n} \cdot 100\% = \frac{0,147}{10} \cdot 100\%$	1,47%

Существует шкала Чеддока, представленная ниже, которая сможет охарактеризовать связи между признаками ( $x$ ) и ( $y$ ), поэтому линейный коэффициент парной корреляции должен принимать значения от -1 до +1:

- 0,1 <  $r_{xy}$  < 0,3 – слабая;
- 0,3 <  $r_{xy}$  < 0,5 – умеренная;
- 0,5 <  $r_{xy}$  < 0,7 – заметная;

$0,7 < r_{xy} < 0,9$  – высокая;

$0,9 < r_{xy} < 1$  – весьма высокая.

В данном случае коэффициент парной корреляции ( $r_{x,y}$ ) равен 0,987, что говорит о весьма высокой связи между значениями.

Для измерения результативного показателя ( $y$ ) и факторного признака ( $x$ ) необходимо вычислять коэффициенты эластичности и бетта-коэффициенты. В настоящей работе коэффициент эластичности ( $E$ ) равен 1,095, который показывает, на сколько процентов изменится признак ( $y$ ) от первоначального значения при изменении фактора ( $x$ ) на 1 %, то есть фактор ( $x$ ) значительно влияет на ( $y$ ).

В свою очередь, бетта-коэффициент указывает на часть величины своего среднего квадратичного отклонения, что изменится в среднем значении результативного признака при изменении факторного признака на величину его среднеквадратического отклонения при фиксированном на постоянном уровне значении остальных независимых переменных. Иными словами, если признак ( $x$ ) увеличить на среднеквадратичное отклонение ( $S_x$ ), равное 0,987, то это приведет к увеличению среднего значения ( $y$ ) на 98,7 %.

Для оценки уравнения регрессии рассчитывали ошибку аппроксимации, показывающую среднее отклонение расчетных значений от фактических. Если ошибка аппроксимации находится в пределах 5–7 %, то это свидетельствует о хорошем подборе уравнения регрессии по отношению к исходным данным, как в данном случае, поскольку ошибка аппроксимации равна 1,47 %.

Таким образом, в работе изучена зависимость ( $y$ ) и ( $x$ ), определена парная линейная регрессия, оценены ее параметры методом наименьших квадратов.

Кроме того, ошибка аппроксимации составила менее 2 %, что показывает высокую эффективность цифрового способа прогнозирования пожароопасных свойств продуктов нефтепереработки на основе молекулярных дескрипторов и искусственных нейронных сетей.

## Литература

1. Королев Д.С., Калач А.В. Применение «deep learning» при прогнозировании пожароопасных показателей кислородсодержащих органических соединений // Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петерб. ун-та ГПС МЧС России». 2017. № 1. С. 60–66.
2. Ларченко Л.В. Нефтегазовая отрасль России: современное состояние и направления развития в условиях неопределенности // Общество. Среда. Развитие. 2019. № 1 (50). С. 9–13.
3. Степанец Л.Ю., Акопян Э.А. Анализ развития и эффективности внедрения цифровизации в нефтегазовую отрасль // Инновационная наука. 2018. № 7–8. С. 69–72.
4. Gazprom-neft (строительство завода). URL: [https://www.gazprom-neft.ru/press-center/news/gazprom\\_neft\\_nachala\\_stroitelstvo\\_pervogo\\_v\\_rossii\\_sovremennogo\\_zavoda\\_po\\_proi\\_zvodstvu\\_katalizat\\_etrov/](https://www.gazprom-neft.ru/press-center/news/gazprom_neft_nachala_stroitelstvo_pervogo_v_rossii_sovremennogo_zavoda_po_proi_zvodstvu_katalizat_etrov/) (дата обращения: 13.08.2020).
5. Статистика пожаров за 2019 год // Пожары и пожарная безопасность в 2019 году: стат. сборник / под общ. ред. Д.М. Гордиенко. М.: ВНИИПО, 2020.
6. Статистика пожаров за 2018 год // Пожары и пожарная безопасность в 2018 году: стат. сборник / под общ. ред. Д.М. Гордиенко. М.: ВНИИПО, 2019.
7. Статистика пожаров за 2017 год // Пожары и пожарная безопасность в 2017 году: стат. сборник / под общ. ред. Д.М. Гордиенко. М.: ВНИИПО, 2018.
8. Статистика пожаров за 2016 год // Пожары и пожарная безопасность в 2016 году: стат. сборник / под общ. ред. Д.М. Гордиенко. М.: ВНИИПО, 2017.
9. Статистика пожаров за 2015 год // Пожары и пожарная безопасность в 2015 году: стат. сборник / под общ. ред. Д.М. Гордиенко. М.: ВНИИПО, 2016.
10. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности: Федер. закон от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ (одобр. Советом Федерации 11 июля 2008 г.) // Рос. газ. 2008. № 163.

11. Mathematical simulation of the process of forecasting the fire hazard properties of substances / D.S. Korolev [et all.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020.

12. Королев Д.С., Калач А.В. Прогнозирование, основанное на молекулярных дескрипторах и искусственных нейронных сетях, как способ исключения образования горючей среды // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2016. № 2. С. 68–72.

13. Королев Д.С., Калач А.В., Сорокина Ю.Н. Сравнительный анализ способов прогнозирования физико-химических свойств веществ // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. 2016. № 1 (23). С. 78–84.

14. Корольченко А.Я., Корольченко Д.А. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения: справочник. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Асс. «Пожнаука», 2004. Ч. I. 713 с.

15. Корольченко А.Я., Корольченко Д.А. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения: справочник. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Асс. «Пожнаука», 2004. Ч. II. 774 с.

### References

1. Korolev D.S., Kalach A.V. Primenenie «deep learning» pri prognozirovanii požaroopasnyh pokazatelej kislorodsoderzhashchih organicheskikh soedinenij // Nauch.-analit. zhurn. «Vestnik S.-Peterb. un-ta GPS MCHS Rossii». 2017. № 1. S. 60–66.

2. Larchenko L.V. Neftegazovaya otrasl' Rossii: sovremennoe sostoyanie i napravleniya razvitiya v usloviyah neopredelennosti // Obshchestvo. Sreda. Razvitie. 2019. № 1 (50). S. 9–13.

3. Stepanec L.Yu., Akopyan E.A. Analiz razvitiya i effektivnosti vnedreniya cifrovizacii v neftegazovuyu otrasl' // Innovacionnaya nauka. 2018. № 7–8. S. 69–72.

4. Gazprom-neft (stroitel'stvo zavoda). URL: [https://www.gazprom-neft.ru/press-senter/news/gazprom\\_neft\\_nachala\\_stroitelstvo\\_pervogo\\_v\\_rossii\\_sovremennogo\\_zavoda\\_po\\_proi-zvodstvu\\_katalizat\\_orov/](https://www.gazprom-neft.ru/press-senter/news/gazprom_neft_nachala_stroitelstvo_pervogo_v_rossii_sovremennogo_zavoda_po_proi-zvodstvu_katalizat_orov/) (data obrashcheniya: 13.08.2020).

5. Statistika požarov za 2019 god // Pozhary i požarnaya bezopasnost' v 2019 godu: stat. sbornik / pod obshch. red. D.M. Gordienko. M.: VNIPO, 2020.

6. Statistika požarov za 2018 god // Pozhary i požarnaya bezopasnost' v 2018 godu: stat. sbornik / pod obshch. red. D.M. Gordienko. M.: VNIPO, 2019.

7. Statistika požarov za 2017 god // Pozhary i požarnaya bezopasnost' v 2017 godu: stat. sbornik / pod obshch. red. D.M. Gordienko. M.: VNIPO, 2018.

8. Statistika požarov za 2016 god // Pozhary i požarnaya bezopasnost' v 2016 godu: stat. sbornik / pod obshch. red. D.M. Gordienko. M.: VNIPO, 2017.

9. Statistika požarov za 2015 god // Pozhary i požarnaya bezopasnost' v 2015 godu: stat. sbornik / pod obshch. red. D.M. Gordienko. M.: VNIPO, 2016.

10. Tekhnicheskij reglament o trebovaniyah požarnoj bezopasnosti: Feder. zakon ot 22 iyulya 2008 g. № 123-FZ (odobr. Sov. Federacii 11 iyulya 2008 g.) // Ros. gaz. 2008. № 163.

11. Mathematical simulation of the process of forecasting the fire hazard properties of substances / D.S. Korolev [et all.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020.

12. Korolev D.S., Kalach A.V. Prognozirovanie, osnovannoe na molekulyarnyh deskriptorah i iskusstvennyh nejronnyh setyah, kak sposob isklyucheniya obrazovaniya goryuchej sredy // Pozhary i chrezvychajnye situacii: predotvrashchenie, likvidaciya. 2016. № 2. S. 68–72.

13. Korolev D.S., Kalach A.V., Sorokina Yu.N. Sravnitel'nyj analiz sposobov prognozirovaniya fiziko-himicheskikh svojstv veshchestv // Vestnik Komandno-inzhenernogo instituta MCHS Respubliki Belarus'. 2016. № 1 (23). S. 78–84.

14. Korol'chenko A.Ya., Korol'chenko D.A. Pozharovzryvoopasnost' veshchestv i materialov i sredstva ih tusheniya: spravochnik. 2-e izd., pererab. i dop. M.: Ass. «Pozhnauka», 2004. Ch. I. 713 s.

15. Korol'chenko A.Ya., Korol'chenko D.A. Pozharovzryvoopasnost' veshchestv i materialov i sredstva ih tusheniya: spravochnik. 2-e izd., pererab. i dop. M.: Ass. «Pozhnauka», 2004. Ch. II. 774 s.