

МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Вестник Сыктывкарского университета.

Серия 1: Математика. Механика. Информатика.

Выпуск 4 (33). 2019

УДК 614.8

ПРИМЕНЕНИЕ РАСЧЕТОВ ВЗРЫВОВ ГАЗА В EXCEL ПРИ ОБУЧЕНИИ БАКАЛАВРОВ НАПРАВЛЕНИЯ «ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ»

С. В. Шилов

В работе предложен метод использования программы Excel в целях обучения бакалавров направления «Техносферная безопасность». Используя данный метод, студенты более глубоко освоят методики расчетов, научатся вводить формулы и грамотно оформлять разделы электронной таблицы, а также отображать опасные зоны на карте местности.

Ключевые слова: техносферная безопасность, Excel, расчет взрывов.

Современная техносфера насыщена используемыми в разных технологиях горючими веществами. Широкое применение получили горючие газы и легковоспламеняющиеся жидкости [1–3]. Для превентивного нахождения опасных параметров взрыва воздушных смесей существуют специализированные программы [4–6]. Преимущества их очевидны —

наглядность, удобство работы, быстрота вычислений, нанесение результата на карту местности, соответствие требованиям нормативных документов. Вместе с тем они достаточно дорогостоящие. К тому же пользователь отстранен от исходного формульного аппарата и от алгоритма вычислений. Студенты даже не представляют, по какой методике идет расчет, каково влияние температуры, скорости испарения, загроможденности окружающего пространства и других параметров на результат расчета. Поэтому обучаемые должны обладать способностью самим создавать электронные таблицы, куда вносятся необходимые формулы, уметь отображать результаты на графиках и наносить зоны поражения на карту местности. Полезен также навык перевода графиков, полученных из литературных источников в цифровой вид. Это дает возможности аппроксимации и получения формулы зависимости, которую уже можно ввести в электронную таблицу для автоматизации расчета. Последнее поясним на примере ниже.

Расчеты взрывов — это часто встречающаяся задача в области техники, поскольку при этом возникают особенно большие разрушения объектов инфраструктуры и поражения людей. Бакалавры, обучающиеся в данной области, должны иметь об этом хорошее понятие. Более глубокому пониманию теоретических знаний, полученных в дисциплинах «Пожаровзрывозащита», «Теория горения и взрыва» и др., в значительной мере будет способствовать самостоятельное моделирование последствий таких аварий. В области взрывных процессов существует целый ряд утвержденных методик. Их можно использовать как целиком, так и отдельные фрагменты. Ввиду необходимости большого количества времени на освоение методик целиком полное их применение це-

лесообразно в рамках выпускных квалификационных работ магистров и бакалавров. Практика последних лет на кафедре инженерной физики и техносферной безопасности СГУ им. Питирима Сорокина показала, что студенты не испытывают существенных трудностей с освоением формульного аппарата и внесением его в электронные таблицы, построением графиков и отображением зон поражения.

Одна из лучших, на наш взгляд, методик расчета взрывов топливно-воздушных смесей — это методика [7]. С помощью нее можно моделировать последствия взрывов как газов, так и паровоздушных смесей. Она не только учитывает класс опасности вещества и вид окружающего пространства, но и использует наиболее прогрессивный подход — вероятностный в оценке повреждения зданий и поражения людей.

Для расчета интенсивности испарения топлива при проливах можно рекомендовать пособие [2], также построенное в основном на утвержденных методиках и раскрывающее их более подробно. При этом в пособии имеется необходимая справочная информация.

Остановимся на моделировании аварии со взрывом газовой смеси на основании [7]. Она детально рассмотрена в публикации [8], поэтому опишем ее кратко.

Расчеты взрыва начинаются с определения эффективного энергоснабжения $E = M_g \cdot q_g$, где M_g — масса горючего вещества в облаке, участвующая в создании поражающих факторов взрыва, кг, q_g — удельная теплота сгорания газа, Дж/кг. Теплоту сгорания студенты могут найти по формуле в методике [7] или в сети «Интернет». За массу газа может быть принят весь объем газа в емкости (это самый простой вариант). Но он справедлив для сжатых газов, не содержащих жидкую фазу. Если

быть более точным, то надо принять, что во взрыве сжиженных под давлением газов участвует лишь $1/2$ всего объема, а для сжиженных охлаждением (метан, например) — всего $1/10$ всего газа [3]. Большинство газов, хранящихся и перевозимых в емкостях, — это пропан-бутановые смеси. И они относятся к сжиженным под давлением. Поэтому целесообразно ставить студентам задачу с такими веществами.

Будет логичным оформить расчет эффективного энергозапаса в виде отдельного блока на странице электронной таблицы Excel (см. рис. 1).



	А	В	С
1			
2	Расчет эффективного энергозапаса, Дж		
3	Мг, кг	163,0	
4	кГ, Дж/кг	43000000	
5	Е, Дж	7,01E+09	

Рис. 1. Блок расчета эффективного энергозапаса

Далее, согласно [7], находятся безразмерные расстояние, давление и импульс, а затем уже реальное давление во фронте волны ΔP и ее ударный импульс I . Данный блок целесообразно сделать ниже на том же листе (см. рис. 2). Следует обращать внимание студентов на то, что горючие газы имеют определенный *класс чувствительности*, и это заложено в [7]. Вещества 1-го класса могут взорваться в минимальном объеме в детонационном режиме. Сюда относят, в частности, водород. Для 4-го класса характерна относительно слабая чувствительность к внешним, провоцирующим взрыв факторам и самый большой размер ячейки детонации.

Необходимо обратить внимание студентов на влияние окружающей

	А	В
7		
8	Нахождение параметров взрыва	
9	R, м	100
10	Po, Па	101325
11	Rx	2,435933834
12	Rx ²	5,933773641
13	Rx ³	14,45427997
14	σ	7
15	классификация окружающей территории	вид 4
16	класс вещества	3
17	режим взрыва	дефлаграция
18	Co, м/с	349
19	Px1	0,025896798
20	Ix1	0,005892923
21	Ln(Rx)	0,890330188
22	Ln(Rx) ²	0,792687843
23	Px2	0,091095281
24	Ix2	0,014569481
25	Px	0,025896798
26	Ix	0,005892923
27	ΔP, Па	2624,0
28	I, Па*с	70,2
29		

Рис. 2. Блок параметров взрыва

территории на избыточное давление ударной волны и ее импульс. Любое препятствие на пути волны вызывает турбулентные потоки во фронте. При этом за препятствием резко возрастает скорость и избыточное давление (давление может вырасти в 15 раз) по сравнению с открытой

местностью. В науке даже введено такое понятие — «турбулизация потока». Поэтому при открытом пространстве последствия взрыва будут существенно меньше.

Полученные значения ΔP и I используются для нахождения вероятностей поражения через пробит-функции Pr . Таким образом, необходим еще один блок. Назовем его блоком оценки поражений. Для перевода пробит-функции в вероятность поражения удобно рядом с данным блоком расположить соответствующую таблицу из методики [7].

Далее стоит задача нахождения опасных зон вокруг центра взрыва. Поскольку все расчеты уже автоматизированы, то это не составляет большого труда. Удобно решать задачу с «конца» и для этого воспользоваться функцией «Анализ что, если», расположенной во вкладке «Данные» программы Excel. Так, если нам надо найти радиус с вероятностью поражения человека ударной волной 90 %, то мы встаем на ячейку с соответствующей пробит-функцией и выбираем в разделе «Анализ что, если» пункт «Подбор параметра». Задаем, что должно подбираться расстояние от центра взрыва, расположенное в соответствующей ячейке (см. рис. 4).

После нахождения опасных расстояний (зон) для людей (также их можно найти для зданий) для наглядности представления используем нанесение кругов на карту. Обычно используют два сервиса — карты Google и Yandex. Для того чтобы отмерить нужные расстояния на карте, необходимо выбрать соответствующие инструменты. На картах Google используется инструмент «Измерить расстояние», на Yandex — «Линейка». Оба инструмента можно вызвать через щелчок правой кнопки мыши в окне сервиса. Добавим еще, что большую реальность

	A	B	C	D	E
31	Блок оценки поражения				
32					
33	Оценка вероятности повреждений промышленных зданий от взрыва ТВС				
34	V_i	фактор			
35	Pr_i	пробит функция			
36					
37	V_1	15013,18613			
38	Pr_1	7,500337884	можно восстановить без сноса		
39					
40	V_2	2385233,502			
41	Pr_2	1,769342332	вероятн что придется сносить		
42					
43	Оценка вероятности поражения людей при взрыве облака ТВС				
44	m (чел)	80	средний вес человека		
45	p (с черточкой)	1,055147755			
46	i (с черточкой)	0,110937124	безразмерный импульс		
47	V_3	15,69883473			
48	Pr_3	-10,80558645	вероятность нокдауна		
49					
50	Pr_4	0,549604197	вероятность разрыва барабанных перепонок		
51					
52	V_5	1530,29565			
53	Pr_5	-12,8930476	вероятность отброса людей волной давления		

Рис. 3. Блок оценки поражения

дает использование карт в режиме «Спутник» или «Гибрид».

Вышеописанная методика для расчета взрывов емкостей с газами может быть применена и для паровоздушных смесей. Для этого необходимо найти массу M (аналогичную массе газа M_g) испарившегося топлива, т. е. паров легковоспламеняющейся жидкости. Для этого студентам можно рекомендовать пособие [2]. Масса испарившейся жидко-

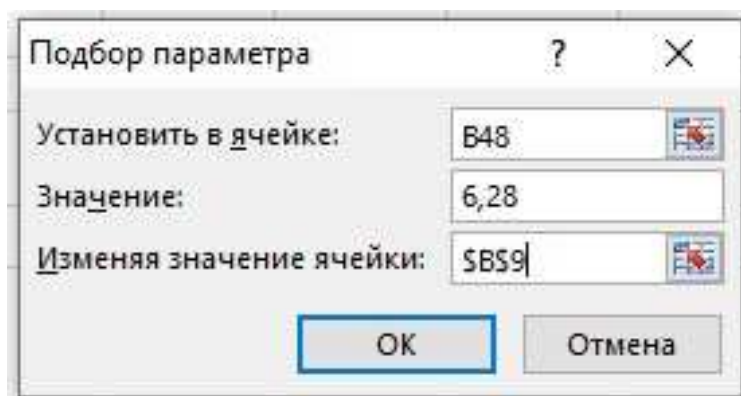


Рис. 4. Использование пункта подбора параметра

сти определяется по формуле

$$M_p = I_p \cdot T \cdot S_p, \text{ кг},$$

где I_p — интенсивность испарения, (кг/с · м²), S_p — площадь разлива, м², а T — продолжительность испарения, с. Необходимая интенсивность испарения определяется из выражения

$$I_p = 10^6 \cdot \eta \cdot M_m \cdot 0,5 \cdot P_H,$$

где η — коэффициент, зависящий от температуры и скорости ветра, M_m — молекулярная масса, кг/кмоль, P_H — давление насыщенных паров, кПа. Последнюю величину можно найти через константы Антуана по формуле

$$P_H = 0,133 \cdot 10^{[A - (B/(C_A + t_p])],}$$

где A , B , C_A — константы Антуана, приведенные для некоторых веществ в [2], t_p — температура воздуха, °С. Для расчета массы испарившегося вещества на практических занятиях можно дать жидкость с известными константами Антуана. Однако при написании выпускных

квалификационных работ можно столкнуться с трудностью их нахождения для конкретного вида разлитой жидкости. Например, для такого широко используемого топлива для реактивных самолетов, как ТС-1, найти константы в литературе весьма проблематично. В данном случае можно использовать опубликованные в источниках экспериментальные зависимости P_H от температуры [1]. Если имеется несколько графиков, то для расчета следует брать наиболее неблагоприятный вариант, где давление паров выше (кривая 1 на рис. 5).

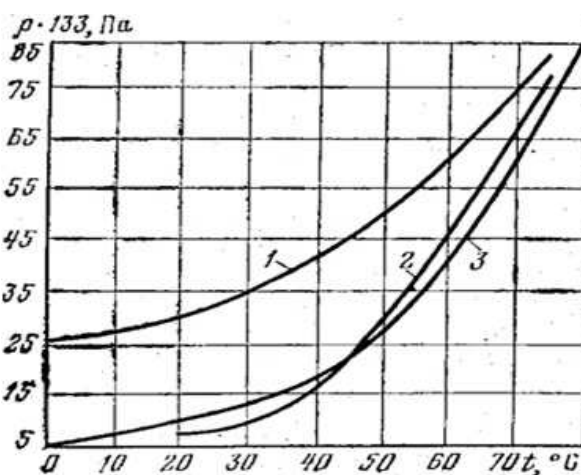


Рис. 5. Зависимость P_H от температуры для топлива ТС-1 по различным источникам

Далее следует этот график оцифровать с помощью онлайн-сервисов или построить его в Excel. В результате мы получаем график с точками. Его можно аппроксимировать (провести линию тренда) и получить аналитическое уравнение кривой (рис. 6). Затем вводим уравнение в нужную ячейку таблицы и получаем возможность автоматического расчета давления насыщенных паров от температуры. В итоге возможен автоматический расчет массы топлива в паровоздушном облаке и

последующие параметры взрыва.

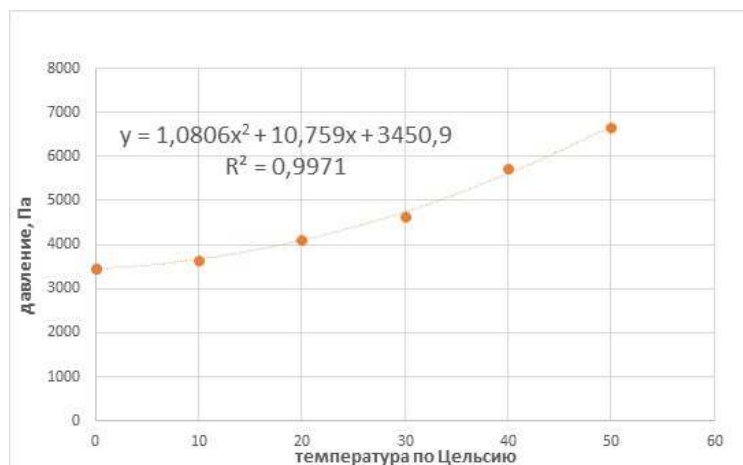


Рис. 6. Аппроксимация данных и получение уравнения зависимости

Следует обратить внимание студентов на метод поиска оптимальной функции, заложенный в программу Excel. Это метод наименьших квадратов, позволяющий найти оптимальную аппроксимационную функцию не только линейного, но и более сложного вида. Главным условием поиска является минимизация суммы квадратов отклонения (невязки Q) между экспериментальными значениями y_i и искомой функцией f по всем точкам:

$$Q = Q(a_0, a_1, a_2, \dots, a_m) = \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i, a_0, a_1, \dots, a_m))^2 \rightarrow \min.$$

Во многих случаях для нелинейной аппроксимации экспериментальных точек достаточно хорошо подходит квадратичная функция. В этом случае невязка принимает вид:

$$Q = Q(a, b, c) = \sum_{i=1}^n (y_i - ax_i^2 - bx_i - c)^2 \rightarrow \min.$$

Так как невязка $Q \geq 0$, то она имеет минимум. А для функции, как известно, необходимое условие минимума – равенство нулю производной по всем переменным. Поэтому отыскание наилучшей квадратичной функции для аппроксимации сводится к решению системы уравнений вида

$$\begin{cases} \frac{dQ}{da} = 0 \\ \frac{dQ}{db} = 0 \\ \frac{dQ}{dc} = 0. \end{cases}$$

После подстановки Q получаем:

$$\begin{cases} \frac{dQ}{da} = 2 \sum_{i=1}^n (y_i - ax_i^2 - bx_i - c) \cdot (-x_i^2) = 0 \\ \frac{dQ}{db} = 2 \sum_{i=1}^n (y_i - ax_i^2 - bx_i - c) \cdot (-x_i) = 0 \\ \frac{dQ}{dc} = 2 \sum_{i=1}^n (y_i - ax_i^2 - bx_i - c) \cdot (-1) = 0. \end{cases}$$

Преобразуем и получим обычную систему из трех линейных уравнений с тремя неизвестными:

$$\begin{cases} a \sum_{i=1}^n x_i^4 + b \sum_{i=1}^n x_i^3 + c \sum_{i=1}^n x_i^2 = \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i \\ a \sum_{i=1}^n x_i^3 + b \sum_{i=1}^n x_i^2 + c \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n x_i y_i \\ a \sum_{i=1}^n x_i^2 + b \sum_{i=1}^n x_i + cn = \sum_{i=1}^n y_i. \end{cases}$$

Ее можно решить различными методами (например, простейшим методом подстановки) и найти искомые коэффициенты аппроксимирующей функции. Все данные операции в Excel производятся автоматически, но нужно иметь представление об их математической основе. Отметим также, что выведенная рядом с уравнением кривой величина

R^2 (см. рис. 6) носит название величины достоверности аппроксимации. Она рассчитывается по отдельной формуле и является критерием точности подгонки кривой к экспериментальным точкам. Если ее величина составляет более 0.85, то обычно считают, что аппроксимация проведена успешно. На практике ее значение выше и практически приближается к единице (см. рис. 6).

Однако следует обратить внимание студентов на то, что R^2 недостаточна для оценки правильности аппроксимации. Более точными критериями являются величины р-значимости коэффициентов зависимости. Получить их можно через пункт меню «Анализ данных», находящийся во вкладке «Данные». Для нахождения коэффициентов квадратичной функции и их р-значимостей необходимо создать три колонки (x_i, x_i^2, y_i) . Соответственно это будут колонки температуры, температуры в квадрате и давление в паскалях (см. экспериментальные точки на рис. 6). После этого нажимаем кнопку «Анализ данных» и выбираем в раскрывшемся меню пункт «Регрессия». Указываем входной интервал Y (колонка давлений), входной интервал X (колонки с температурой и температурой в квадрате). Уровень надежности оставляем 95 %. Для отображения результатов в выходном интервале отмечаем его круглую кнопку, щелкаем на свободное место в таблице или выбираем кнопку «Новый рабочий лист». В результате получаем полный набор значений, сведенных в таблицу (см. рис. 8).

Среди них можно видеть полученный нами ранее коэффициент R^2 . Под Y-пересечением понимается свободный коэффициент уравнения. Переменная X1 — это коэффициент перед первой степенью x , а X2 — перед второй (ср. с рис. 6). Рядом с ними можно видеть стандартные

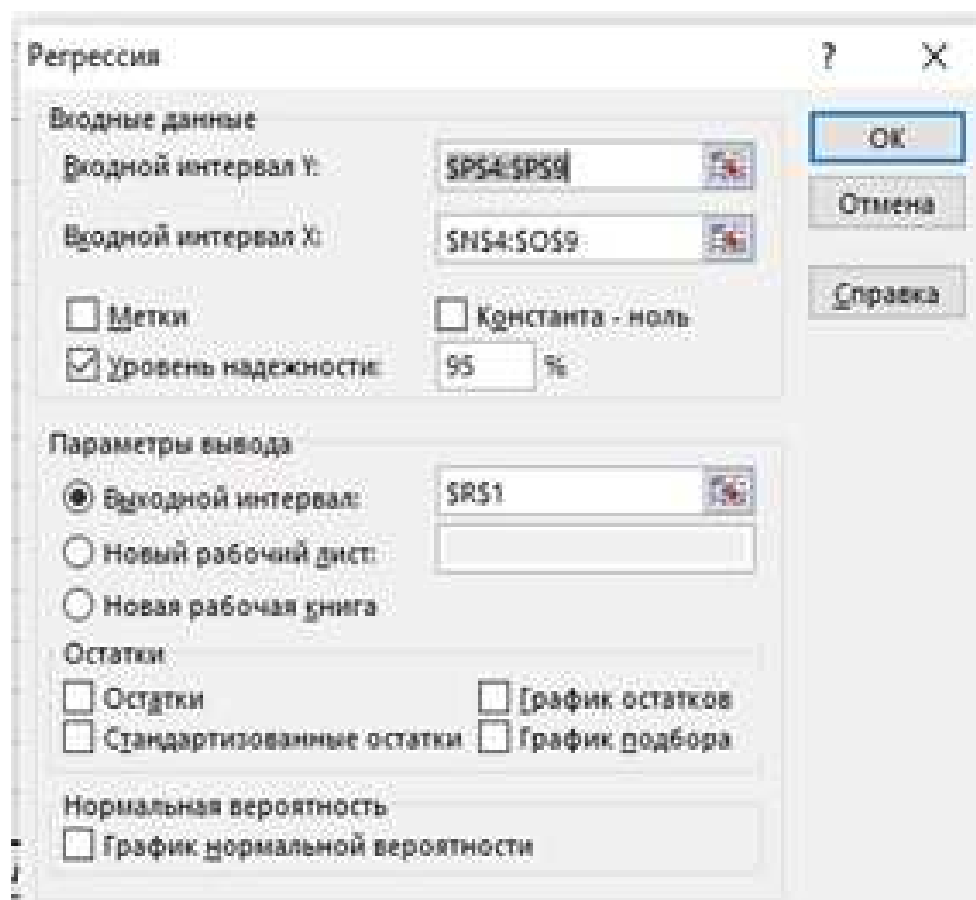


Рис. 7. Окно регрессионного анализа в Excel

ошибки. Значения t-статистики — это отношение коэффициент / стандартная ошибка. За ним следует колонка с нужными нам р-значениями. При величине $p < 0,05$ можно доверять полученным значениям коэффициентов и модели аппроксимации в целом [9]. Как можно видеть на рис. 8, два полученных коэффициента удовлетворяют данному условию. Третий из них, равный 0,241, существенно больше 0,05. Таким образом, проведенный регрессионный анализ показывает в целом сомнительность сделанной аппроксимации. Для повышения р-значимости

	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
Вывод итогов									
Регрессионная статистика									
Множественный R	0,998556086								
R-квадрат	0,997114256								
Нормированный	0,995190427								
Стандартная ошибка	86,64465265								
Наблюдения	6								
Дисперсионный анализ									
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Значимость F</i>				
Регрессия	2	7782012,321	3891006,16	518,2966339	0,00015502				
Остаток	3	22521,8875	7507,295833						
Итого	5	7804534,208							
	<i>Коэффициент</i>	<i>Стандартная ошибка</i>	<i>t-статистика</i>	<i>P-Значение</i>	<i>Нижние 95%</i>	<i>верхние 95%</i>	<i>нижние 95%</i>	<i>верхние 95%</i>	<i>Срхние 95,0%</i>
Y-пересечение	3450,875	78,52838526	43,94430101	2,5939E-05	3200,96263	3700,787	3200,963	3700,787	
Переменная X 1	10,75875	7,386606369	1,456521366	0,241283478	-12,74872815	34,26623	-12,7487	34,26623	
Переменная X 2	1,080625	0,1418056	7,620467752	0,004690697	0,629336293	1,531914	0,629336	1,531914	

Рис. 8. Окно с результатами анализа

можно рекомендовать увеличить количество точек для построения (в нашем примере их бралось шесть). При этом следует ожидать уменьшения и стандартной ошибки [9]. Если данная мера не помогает, то целесообразно использовать другую модель аппроксимации.

Таким образом, регрессионный анализ позволяет студентам оценить достоверность подобранной для экспериментальных точек функции.

В целом таблица расчета взрыва паровоздушной смеси может содержать три раздела, расположенных для удобства на отдельных листах:

- «Расчет массы испарившегося топлива»;
- «Расчет взрыва паров»;
- «Зависимость давления ударной волны от расстояния до центра взрыва и зоны поражения, нанесенные на карту».

Можно сказать, что создание таких электронных таблиц углубит понимание бакалаврами методик проведения аппроксимации, расчета, того, как влияет класс опасности вещества, окружающее пространство,

температура на параметры взрывов. Также это даст возможность быстро смоделировать и отобразить последствия аварий на карте окружающей территории.

Список литературы

1. **Волков О. М., Проскуряков Г. А.** Пожарная безопасность на предприятиях транспорта и хранения нефти и нефтепродуктов. М.: Недра, 1981. 256 с.
2. Пожаровзрывозащита : учебное пособие / сост. А. И. Сечин, О. С. Кырмакова; Томский политехнический университет. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. 248 с.
3. **Храмов Г. Н.** Горение и взрыв. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2007. 278 с.
4. Комплекс прогнозирования чрезвычайных ситуаций. URL: <https://gisinfo.ru/products/emergency.htm> (дата обращения: 25.09.2019).
5. Программа «Дефлаграция». URL: <http://www.titan-optima.ru/programm/deflagrodisgroup.ru> (дата обращения: 25.09.2019).
6. Программа «Токси+». URL: <https://www.softsalad.ru/software> (дата обращения: 25.09.2019).
7. Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей : руководство по безопасности (утв. Приказом Ростехнадзора от 31.03.2016 N 137).

8. **Шилов С. В.** Моделирование опасных факторов взрыва автоцистерн с сжиженным газом // *Математическое моделирование и информационные технологии: Национальная (Всероссийская) научная конференция (6-8 декабря 2018 г., г. Сыктывкар) : сборник материалов / отв. ред. А. В. Ермоленко. Сыктывкар: Изд-во СГУ им. Питирима Сорокина, 2018. 161 с. С. 49–51.*
9. **Карлберг К.** Регрессионный анализ в Microsoft Excel. М.: Диалектика, 2017. 400 с.

Summary

Shilov S. V. The use of explosion calculations in Excel when teaching bachelors in the direction of «technosphere safety»

The paper proposes a method of using the Excel program in order to train bachelors in the direction of «technosphere security». Using this method, students will more deeply master the methods of calculations, learn how to enter formulas and competently design sections of the spreadsheet, as well as display hazardous areas on the map.

Keywords: technosphere safety, Excel, explosion calculation.

References

1. **Volkov O. M., Proskuryakov G. A.** *Pozharnaya bezopasnost' na predpriyatiyakh transporta i khraneniya nefti i nefteproduktov* (Fire safety at the enterprises of transport and storage of oil and oil products), М.: Nedra, 1981, 256 p.

2. *Pozharovzryvozashchita: uchebnoye posobiye* (Fire and explosion protection: study guide), compilers.: A. I. Sechin, O. S. Kirmakova, Tomsk Polytechnic University, Tomsk: Publishing House of Tomsk Polytechnic University, 2015, 248 p.
3. **Hramov G. N.** *Goreniye i vzryv* (Burning and explosion), Saint-Petersburg, St. Petersburg State Technical University Publ, 2007, 278 p.
4. Kompleks prognozirovaniya chrezvychaynykh situatsiy (Complex of forecasting of emergency situations), URL: <https://gisinfo.ru/products/emergency.htm> (date of the application: 25.09.2019).
5. Programma «Deflagratsiya» (The Program «Deflagration»), URL: <http://www.titan-optima.ru/programm/deflagrodisgroup.ru> (date of the application: 25.09.2019).
6. Programma «Toksi+» (The Program «Toxi+»), URL: <https://www.softsalad.ru/software> (date of the application: 25.09.2019).
7. Rukovodstvo po bezopasnosti «Metodika otsenki posledstviy avariynykh vzryvov toplivno-vozdushnykh smesey» (Safety Guide «Methods for assessing the effects of emergency explosions of fuel-air mixtures») Series 27. Issue 15. Moscow, Closed Joint Stock Company «Scientific and Technical Center for the Study of Industrial Safety Problems», 2015, 44 p.
8. **Shilov S. V.** Modelirovaniye opasnykh faktorov vzryva avtotsistern s szhizhennym gazom (The calculation of hazardous areas explosion

of tanks with liquefied gas), *Mathematical modeling and information technologies: national (all-Russian) scientific conference* (6-8 December 2018, Syktyvkar): collection of materials, Executive editor. A. V. Ermolenko, Syktyvkar: Publishing house of SSU Pitirima Sorokina, 2018, pp. 49–51.

9. **Carlsberg К.** Regressionnyy analiz v Microsoft Excel (Regression analysis in Microsoft Excel), Moscow: Dialectics, 2017, 400 p.

Для цитирования: Шилов С. В. Применение расчетов взрывов в Excel при обучении бакалавров направления «Техносферная безопасность» // *Вестник Сыктывкарского университета. Сер. 1: Математика. Механика. Информатика. 2019. Вып. 4 (33). С. 96–113.*

For citation: Shilov S. V. The use of explosion calculations in Excel when teaching bachelors in the direction of «technosphere safety», *Bulletin of Syktyvkar University. Series 1: Mathematics. Mechanics. Informatics*, 2019, 4 (33), pp. 96–113.