ЛІТЕРАТУРА

1. Абрамов Ю.О., Грінченко Є.М., Кірочкін О.Ю. та ін. Моніторінг надзвичайних ситуацій. Підручник. Вид-во: АЦЗУ м. Харків, 2005.- 530 с.
2. Бабич О.С. Підвищення ефективності знезараження шляхом застосування конверсійних палив. //Проблеми надзвичайних ситуацій. Зб. наук. пр. УЦЗ України. Вип. 8.- Харків: УЦЗУ, 2008. – С. 20-29.
3. Бабич О.С., Денісова О.О., Улексін В.А. Підвищення ефективності заходів цивільного захисту шляхом застосування конвексійних палив. Харків Вісник ХНТУСГ.- вип. 59 . 2007р. ст.459-465.
4. Баррер М. і др. Ракетные двигатели. «Оборонгиз». М.: 1962 г. – 799с.

УДК 614.8

Басманов А.Е., д-р техн. наук, гл. науч. сотр., УГЗУ,
Михайлюк А.А., адъюнкт, УГЗУ

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕГРЕССИОННОЙ МОДЕЛИ, ОПИСЫВАЮЩЕЙ ЛОКАЛИЗАЦИЮ ЧРЕЗВЫЧАЙНОЙ СИТУАЦИИ

(представлено д-ром техн. наук Яковлевой Р.А.)

Получены оценки параметров регрессионной модели локализации чрезвычайной ситуации техногенного характера на примере пожара в резервуаре с нефтепродуктом

Постановка проблемы. Применение математических моделей чрезвычайных ситуаций техногенного характера для прогнозирования их развития и построения плана локализации и ликвидации требует идентификации параметров таких моделей. Одной из наиболее сложных чрезвычайных ситуаций является пожар в резервуарном парке. Для проведения успешных действий по локализации чрезвычайной ситуации в резервуарном парке необходимо обеспечить достаточное охлаждение резервуара. Важным параметром модели охлаждения является площадь области стенки, охлаждаемой одним стволом.

Анализ последних исследований и публикаций. В работе [1] рассмотрено взаимодействие водной струи со стенкой резервуара, при этом площадь охлаждаемой поверхности и граница водной пленки после удара струи о стенку не рассматриваются. Вопросам струйного охлаждения в технологических аппаратах посвящена работа [2], но в ней подача воды осуществляется равномерно по всему периметру так, что вся поверхность оказывается покрытой водной пленкой.

Постановка задачи и ее решение. Целью работы является оценка параметров регрессионной модели локализации чрезвычайной ситуации на примере зависимости площади охлаждаемой области стенки резервуара от параметров подачи воды пожарным стволом.

Оценка площади области, покрытой водой, проводилась экспериментально. При проведении эксперимента подача воды осуществлялась с помощью насоса пожарного автомобиля марки АЦ-40 130 63Б при постоянном давлении $6\,\text{атм}$ стволами РСК-50, РС-70. Подача воды проводилась сплошной струей на вертикальную железную стенку размером $4 \times 6\,\text{м}$ с расстояний $7\,\text{м}\,\text{и}\,14\,\text{м}$; под прямым углом и углом 45° по горизонтали; под прямым углом и углом 30° по вертикали каждым из стволов. При попадании на железную стенку вода стекала, образуя пятно, по форме близкое к параболе, размеры которой замерялись. В ходе эксперимента исследовалось влияние на площадь охлаждения следующих четырех факторов: расстояния, с которого подавалась вода на охлаждение, угла подачи по горизонтали, диаметра насадка и угла подачи по вертикали (табл. 1).

Таблица 1 – Факторы и границы их изменения

№	Переменная	Фактор	Мин. значение	Макс. значение
1	x_1	Расстояние, м	7	14
2	x_2	Угол подачи по горизонтали, град.	0	43,6
3	x_3	Диаметр насадка, мм	13	19
4	x_4	Угол подачи по вертикали, град.	0	30

Каждый из перечисленных факторов обозначим $X_i, i = 1,2,...n$. При этом будем предполагать, что фактор X_i может принимать значения из промежутка $\left[X_{i1,} X_{i2}\right]$. Обозначим через $X_i^0 = \left(X_{i1} + X_{i2}\right)/2$ основной уровень фактора X_i; $S_i = \left(X_{i2} - X_{i1}\right)/2$ – интервал варьирования [3].

Введем кодированные переменные x_i

$$x_i = \frac{X_i - X_i^0}{S_i}, i = 1,2,...,n. \tag{1}$$

Очевидно, что после такого линейного преобразования каждый из факторов будет принимать значения из отрезка $[-1, 1]$. Для исследования силы влияния факторов построим уравнение регрессии

$$\begin{aligned} \widetilde{S} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{14} x_1 x_4 + \\ \beta_{23} x_2 x_3 + \beta_{24} x_2 x_4 + \beta_{34} x_3 x_4 + \beta_{123} x_1 x_2 x_3 + \beta_{124} x_1 x_2 x_4 + \\ \beta_{134} x_1 x_3 x_4 + \beta_{234} x_2 x_3 x_4 + \beta_{1234} x_1 x_2 x_3 x_4, \end{aligned} \tag{2}$$

где $\beta_{...}$ – неизвестные коэффициенты, которые необходимо найти; $\widetilde{S}$ – оценка площади области охлаждения горящего резервуара. Эти коэффициенты могут быть найдены по методу наименьших квадратов

$$\sum_{u=1}^{N} \left(S_u - \widetilde{S}_u\right)^2 \to \min_{\beta}, \tag{3}$$

где S_u – результат u-го эксперимента; $\widetilde{S}$ – значение полученное по регрессионной модели; N – количество экспериментов.

Поскольку общее количество неизвестных коэффициентов β равно $2^n = 16$, то необходимо провести, как минимум, такое же количество экспериментов. При этом для оценки адекватности регрессионной модели, построенной по результатам эксперимента, необходимо чтобы количество точек, в которых проводится эксперимент, превосходило количество оцениваемых параметров и также необходима оценка дисперсии наблюдений. Для решения этих задач необходимо провести эксперимент не только в точках

$x_i = \pm 1$, но и хотя бы в одной промежуточной, а для оценки дисперсии необходимо проводить повторные наблюдения при одинаковых значениях параметров. Таким образом, эксперимент был проведен в 18 точках, в каждой из которых он повторялся по 4 раза.

Пусть в каждой точке $(x_1, x_2, ..., x_n)$ проводится m повторных наблюдений. Составим матрицу плана X, строками которой будут координаты точки проведения экспериментов

$$X = \begin{pmatrix} 1 & x_1^1 & x_2^1 & ... & x_1^1 x_2^1 & ... & x_1^1 ... x_n^1 \\ ... & ... & ... & ... & ... & ... & ... \\ 1 & x_1^1 & x_2^1 & ... & x_1^1 x_2^1 & ... & x_1^1 ... x_n^1 \\ ... & ... & ... & ... & ... & ... & ... \\ 1 & x_1^q & x_2^q & ... & x_1^q x_2^q & ... & x_1^q ... x_n^q \\ ... & ... & ... & ... & ... & ... & ... \\ 1 & x_1^q & x_2^q & ... & x_1^q x_2^q & ... & x_1^q ... x_n^q \end{pmatrix},$$

в которой повторяющиеся строки соответствуют повторным наблюдениям, x_i^k – значения фактора x_i при k-ом наборе параметров. Выбрав из матрицы X только неповторяющиеся строки, получим матрицу $\overline{X}$, а также усреднив соответствующие им наблюдения, получим матрицу $\overline{Y}$

$$\overline{X} = \begin{pmatrix} 1 & x_1^1 & x_2^1 & ... & x_1^1 x_2^1 & ... & x_1^1 ... x_n^1 \\ 1 & x_1^2 & x_2^2 & ... & x_1^2 x_2^2 & ... & x_1^2 ... x_n^2 \\ ... & ... & ... & ... & ... & ... & ... \\ 1 & x_1^q & x_2^q & ... & x_1^q x_2^q & ... & x_1^q x_n^q \end{pmatrix}, \ \overline{Y} = \begin{pmatrix} \overline{y}_1 \\ \overline{y} \\ ... \\ \overline{y}_q \end{pmatrix}.$$

Применяя метод наименьших квадратов, оценим параметры β, исходя из матриц $\overline{X}$ и $\overline{Y}$. Подставим коэффициенты β в уравнение (2) и получим расчетные значения y_u. После этого проверим воспроизводимость процесса по критерию Кохрена [3]

$$G = s_{u\ макс}^2 \Big/ \sum_{u=1}^{n} s_u^2 < G_{(0{,}05;\ N;\ m-1)}, \tag{4}$$

где $s_u^2 = \sum_{p=1}^{m} \left(y_{u_p} - \bar{y}_u\right)^2 \Big/ (m-1)$ – дисперсия, характеризующая рассеяние результатов опытов на u-м сочетании уровней факторов; m – число параллельных экспериментов; $s_{u\,макс}^2$ – наибольшая из дисперсий в строчках плана; $G_{(0{,}05;\, n;\, m-1)}$ – табличное значение критерия Кохрена при 5%-ом уровне значимости.

Процесс считается воспроизводимым, если выполняется неравенство (4). При этом дисперсия воспроизводимости определяется по формуле

$$s_y^2 = \sum_{u=1}^{n} s_u^2 \Big/ N. \tag{5}$$

Подстановка численных данных в (4) дает

$$G = 0{,}129 < G_{(0{,}005;\, 18;\, 3)} = 0{,}22. \tag{6}$$

При этом дисперсия воспроизводимости согласно формуле (5) составляет $s_y^u = 0{,}0051$.

Проверка адекватности линейной модели выполняется с помощью критерия Фишера [3]: модель считается адекватной, если имеет место неравенство

$$F = s_{ад}^2 \Big/ s_y^2 < F_{(0{,}05;\, n-k;\, n\cdot m-n)}, \tag{7}$$

где $s_{ад}^2 = \sum_{u=1}^{n} \left(\bar{y}_u - y_u\right)^2 \Big/ (n-k)$; y_u – расчетное значение отклика в u-м опыте; $F_{(0{,}05;\, n-k;\, n\cdot m-n)}$ – значение критерия Фишера при 5%-ном уровне значимости; k – число параметров уравнения регрессии.

Подстановка численных данных в (7) дает: $F = s_{ад}^2 \big/ s_y^2 = 2{,}6 < F_{(0{,}05;\, 2;\, 54)} = 3{,}15$, что подтверждает адекватность модели.

Теперь рассмотрим вопрос о значимости рассчитанных коэффициентов, т.е. гипотезу об их равенстве нулю. В [3] показано, что величина

$$t_j = \left|\hat{\beta}_j\right| \Big/ s_y \sqrt{\sum_{i=1}^{N} x_{ij}^2} \sim t_{N-k} \qquad (8)$$

имеет распределение Стьюдента с $N-k$ степенями свободы (табл.2).

Таблица 2 – Оценка эффектов взаимодействия факторов

№	Коэффициент	Сочетание факторов	Эффект	Значимость
1	β_0	1	0,5935	1,944971
2	β_1	x_1	-0,0176	0,061176
3	β_2	x_2	-0,3859	1,341354
4	β_3	x_3	0,028	0,091759
5	β_4	x_4	-0,0547	0,190132
6	β_{12}	x_{12}	0,0565	0,196389
7	β_{13}	x_{13}	-0,0136	0,047272
8	β_{14}	x_{14}	0,0016	0,005561
9	β_{23}	x_{23}	-0,0156	0,054224
10	β_{24}	x_{24}	0,0351	0,122005
11	β_{34}	x_{34}	-0,0028	0,009733
12	β_{123}	x_{123}	-0,0122	0,042406
13	β_{124}	x_{124}	-0,0051	0,017727
14	β_{134}	x_{134}	0,0012	0,004171
15	β_{234}	x_{234}	0,0014	0,004866
16	β_{1234}	x_{1234}	0,0011	0,003824

Критическое значение распределения Стьюдента для уровня значимости $\alpha = 0{,}05$ составляет $t_{кр} = 4{,}3$. Будем поочередно исключать те коэффициенты, значимость которых будет меньше $t_{кр}$. Будем повторять процесс до тех пор, пока не окажется, что все оставшиеся параметры являются значимыми (табл. 3), либо модель не перестанет быть адекватной.

Таблица 3 – Оценка эффектов взаимодействия факторов после исключения незначащих факторов

№	Коэффициент	Сочетание факторов	Эффект	Значимость
1	β_0	1	0,5935	1,944971
2	β_2	x_2	-0,3859	1,341354
3	β_4	x_4	-0,0547	0,190132
4	β_{24}	x_{24}	0,0351	0,122005

После исключения незначащих факторов была проверена адекватность данной модели $F = s_{a\partial}^2 / s_y^2 = 2{,}8 < F_{(0{,}05;\,2;\,54)} = 3{,}15$, следовательно, наша линейная модель адекватна.

Выводы. Получены оценки параметров регрессионной модели локализации чрезвычайной ситуации, связанной с пожаром в резервуаре с нефтепродуктом. Полученные результаты показывают, что в рассмотренном диапазоне изменения параметров на площадь охлаждения влияет угол подачи струи по горизонтали и по вертикали, а диаметр насадка и расстояние до резервуара существенного влияния не оказывают.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамов Ю.А., Басманов А.Е. Предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций в резервуарных парках с нефтепродуктами. – Харьков: УГЗУ, 2006. – 256 с.
2. Воронцов Е.Г., Тананайко Ю.М. Методы расчета и исследования пленочных процессов. – Киев: Техника, 1975. – 311 с.
3. Винарский М.С., Лурье М.В. Планирование эксперимента в технологических исследованиях. – Киев: Техника, 1975. – 168 с.