

АЛГОРИТМЫ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ С ЭКОНОМИЧЕСКИМ ПОДХОДОМ К ВЕРОЯТНОСТИ ПОЖАРОВ НА ХОЗЯЙСТВЕННЫХ ОБЪЕКТАХ (НА ПРИМЕРЕ ВОРОНЕЖСКОЙ ОБЛАСТИ)

Ю. Н. Зенин, С. Н. Тростянский, Г. А. Бакаева

Используется математическая модель, описывающая вероятность возникновения пожаров на хозяйственных объектах в зависимости от экономических и административно-правовых факторов, определяющих долю нарушителей требований пожарной безопасности среди собственников объектов. Модель создана на базе гипотезы рационального правонарушителя. Представлены алгоритмы, позволяющие оценить долю нарушителей требований пожарной безопасности среди собственников хозяйственных объектов на определенной территории в определенный временной период, которым выгодно экономить на нарушениях требований пожарной безопасности при действующих экономических условиях, а также алгоритм оценки средней величины такой экономии. Показано применение алгоритма для определения указанных параметров на примере статистических данных, полученных в Воронежской области.

Ключевые слова: математическое моделирование, пожарная безопасность, вероятность возникновения пожаров, алгоритм оценки параметров модели, модель рационального правонарушителя.

Введение. Математическая модель, описывающая вероятность возникновения пожаров на хозяйственных объектах в зависимости от экономических и административно-правовых факторов, определяющих долю нарушителей требований пожарной безопасности среди собственников объектов, рассматривалась в работе [1]. В основу модели положена гипотеза рационального правонарушителя, предполагающая, что нарушение собственниками хозяйственных объектов требований пожарной безопасности происходит только в том случае, если ожидаемая прибыль, т. е. экономия на расходах по обеспечению требований пожарной безопасности объектов, превышает возможные в случае пожара и (или) штрафа убытки. В предложенной модели учитываются возможные потери собственников от пожаров на объектах и штрафных санкций, а также их возможные незаконные прибыли от экономии на несоблюдении этих требований.

Зенин Юрий Николаевич, начальник Воронежского института ГПС МЧС России; Россия, г. Воронеж, e-mail: vigps@mail.ru
Тростянский Сергей Николаевич, д-р техн. наук, доц., проф. кафедры физики, Воронежский институт ГПС МЧС России; Россия, г. Воронеж, тел.: (473)2363-305; e-mail: trostyansky2012@yandex.ru
Бакаева Галина Александровна, канд. техн. наук, доц. кафедры пожарной безопасности технологических процессов Воронежский институт ГПС МЧС России; Россия, г. Воронеж, e-mail: vigps@mail.ru

С началом действия Федерального закона «О внесении изменений в Кодекс Российской Федерации об административных правонарушениях по вопросам пожарной безопасности» от 03.06.2011 № 120-ФЗ существенно увеличились размеры административных штрафов, накладываемых на граждан, должностных лиц и юридических лиц за нарушение требований пожарной безопасности. Представляется интересным с использованием математической модели с экономическим подходом [1] и статистических данных по пожарам определить влияние исполнения этого Федерального закона на долю собственников хозяйственных объектов, нарушающих требования пожарной безопасности, а также провести оценки величин средней прибыли от экономии собственниками объектов на выполнении требований пожарной безопасности за различные годы. Расчеты указанных параметров рассмотрим на основе соответствующих разработанных алгоритмов с использованием статистических данных Государственной противопожарной службы по Воронежской области за период 2000—2012 гг.

Теоретические расчеты и результаты. Количество пожаров K , возникающих на хозяйственных объектах за единицу времени на определенной территории, представим в виде суммы количества K_p пожаров, возникающих по причинам нарушений требований пожарной безопасности, т. е. обусловленных профилактируемыми Государственной противопожарной службой (ГПС) факторами, и количества пожаров K_n , происходящих по причинам, связанным с факторами, не профилактируемыми ГПС, т. е.

$$K = K_n + K_p. \quad (1)$$

Причины пожаров, которые связаны с человеческим фактором и относятся к профилируемым ГПС, составляют, как показано в [2], более 70 % от общего количества пожаров, поэтому, предполагая линейную зависимость количества таких пожаров от общего количества хозяйственных объектов с нарушениями требований пожарной безопасности, выражение для вероятности возникновения пожаров на хозяйственных объектах в определенный интервал времени с учетом статистического определения частоты пожаров можно записать как

$$p = \frac{K}{N} = \frac{(K_n + K_p)}{N} = \frac{(K_n + k \cdot C \cdot N)}{N} = p_n + p_p = p_n + kC, \quad (2)$$

где k — региональный коэффициент пропорциональности между вероятностью пожаров, обусловленных профилируемыми факторами, и долей C среди хозяйственных объектов, собственники которых нарушают требования пожарной безопасности; N — общее количество хозяйственных объектов на данной территории; p_n, p_p — вероятности возникновения пожаров за счет соответственно не профилируемых и профилируемых ГПС факторов.

Расчет экономического множителя C , отражающего экономическое представление хозяйствующих субъектов о целесообразности нарушения требований пожарной безопасности и определяющего долю собственников объектов, которым выгодно экономить средства за счет несоблюдения названных требований, проведен на основе экономической модели рационального правонарушителя [1]. Рациональный правонарушитель в качестве ожидаемой прибыли b может рассматривать экономию на расходах по обеспечению пожарной безопасности объектов, а в качестве наказания может нести убытки u при возникновении пожаров с вероятностью p на объектах и убытки H от штрафных санкций за нарушения требований пожарной безопасности с ожидаемой их вероятностью таких санкций за единицу времени f . При этом считается, что потенциальный правонарушитель на основе своего либо чужого опыта может оценивать вероятности p и f .

Таким образом, рациональный правонарушитель пойдет на нарушение требований пожарной безопасности на объекте своей собственности лишь при условии

$$(1 - p)(b - fH) > pu. \quad (3)$$

Экономический множитель C определяется формулой [1]

$$C = \int_{fH}^{\infty} \int_0^{(1-p)(b-fH)/p} \rho_{\mu, \sigma_u}(u) \rho_{\eta, \sigma_b}(b) du db, \quad (4)$$

$$\rho_{\mu, \sigma_u}(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_u}u} \exp\left\{-\frac{[\ln(u) - \ln(\mu)]^2}{2\sigma_u^2}\right\},$$

$$\rho_{\eta, \sigma_b}(b) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_b}b} \exp\left\{-\frac{[\ln(b) - \ln(\eta)]^2}{2\sigma_b^2}\right\},$$

где $\rho_{\mu, \sigma_u}(u)$ — плотность логнормально распределенной случайной величины u потерь собственников объектов от одного пожара; μ — среднее значение для соответствующего распределения величины потерь от одного пожара; σ_u — дисперсия распределения величины потерь от пожаров; $\rho_{\eta, \sigma_b}(b)$ — плотность логнормально распределенной случайной величины b прибыли собственников объектов за год от экономии на несоблюдении требований пожарной безопасности, со средним значением η для соответствующего распределения и дисперсией σ_b .

На основе предложенной модели с экономическим подходом и статистических данных, регистрируемых ГПС МЧС России, представим алгоритмы расчета доли собственников C , нарушающих требования пожарной безопасности и расчета среднего выигрыша B собственников от экономии на несоблюдении требований пожарной безопасности. Расчет будем проводить на примере статистических данных ГПС МЧС по Воронежской области. В частности, найдем значения C и B по Воронежской области в 2010 и 2012 годах, то есть до и после введения в действие Федерального закона «О внесении изменений в Кодекс Российской Федерации об административных правонарушениях по вопросам пожарной безопасности» от 03.06.2011 г. № 120-ФЗ.

При изменении экономических и административно-правовых факторов и соответствующего этому изменению экономического множителя C на величину ΔC , согласно модели [1], динамика вероятности возникновения пожаров $p(t)$ на хозяйственных объектах определяется формулой

$$p(t) = p_n + p_p(t_0) \exp\left[-g \frac{\Delta C}{C}(t - t_0)\right], \quad (5)$$

где g — вероятность выполнения требований пожарной безопасности за единицу времени собственниками объектов, для которых выполнение требований пожарной безопасности при изменении экономического множителя C становится выгодным (если $C_0 > C_1$). При $\Delta C > 0$ эта формула аналогична формуле

$$p(t) = p_n + p_p(t_0) \exp[-\lambda(t - t_0)], \quad (6)$$

приведенной в [2], на основании обработки статистических данных по динамике количества пожаров на определенных территориях за различные промежутки времени.

Тогда параметры $p_n(t_0)$, $p_p(t_0)$ и λ для этого временного ряда находятся с применением статистического пакета SPSS как параметры нелинейной регрессии. В частности, на основе данных ГПС по Воронежской области за 2006—2012 гг. найдены следующие значения параметров временного ряда (6):

$$p_n(t_0) = 0,005; p_p(t_0) = 0,013; \lambda = 0,119.$$

Тогда динамика вероятности возникновения пожаров $p(t)$ на хозяйственных объектах Воронежской области в период 2006—2012 гг. описывается формулой

$$p(t) = p_n + p_p(t_0) \exp[-\lambda(t-t_0)] = 0,005 + 0,013 \exp[-0,119(t-t_0)], \quad (7)$$

где t измеряется в годах; $p_p(t_0)$ — вероятность возникновения пожаров за счет профилируемых ГПС факторов на хозяйственных объектах Воронежской области в 2006 г. При сравнении расчетных данных по формуле (7) с данными статистики ГПС по Воронежской области показатель квадрата корреляции $R^2 = 0,899$, что свидетельствует о корректности применения данной модели для прогнозных расчетов динамики вероятности возникновения пожаров на хозяйственных объектах.

Используем статистические данные, в соответствии с которыми вероятности возникновения пожаров на хозяйственных объектах Воронежской области в 2010 и 2012 годах составляют соответственно $p_{2010} = 0,014025$, $p_{2012} = 0,010236$. Из (7) следует, что $p_n = p_{n2010} = p_{n2012} = 0,005$. Полагая неизменными величины региональных коэффициентов пропорциональности k_{2010} и k_{2012} для периода времени с 2010 по 2012 гг., отношение вероятностей возникновения пожаров на хозяйственных объектах за счет профилируемых ГПС факторов с учетом (2) будет составлять

$$\frac{p_{2010} - p_n}{p_{2012} - p_n} = \frac{k_{2010} C_{2010}}{k_{2012} C_{2012}} = \frac{C_{2010}}{C_{2012}}. \quad (8)$$

Левая часть равенства (8) представляет экспериментальное значение, определяемое из статистических данных вероятности возникновения пожаров на хозяйственных объектах Воронежской области, и составляет 1,724.

Представим правую часть равенства (8) с учетом формулы (4), описывающей экономический множитель, тогда выражение (8) примет вид

$$\left(\int_{fH_{2010}}^{\infty} \left(0,5 + 0,5 \operatorname{erf} \left\{ \frac{1}{\sqrt{2}\sigma_u u_{2010}} \right\} \times \ln \left[\frac{(1-p_{2010})(b-fH_{2010})}{P_{2010} u_{2010}} \right] \right) \right) \times \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{b2010} b} \cdot \exp \left(- \left[\frac{\ln b - \ln B}{\sqrt{2}\sigma_{b2010}} \right]^2 \right) db \times \quad (9)$$

$$\times \left(\int_{fH_{2012}}^{\infty} \left(0,5 + 0,5 \operatorname{erf} \left\{ \frac{1}{\sqrt{2}\sigma_u u_{2012}} \right\} \times \ln \left[\frac{(1-p_{2012})(b-fH_{2012})}{P_{2012} u_{2012}} \right] \right) \right) \times \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{b2012} b} \cdot \exp \left(- \left[\frac{\ln b - \ln B}{\sqrt{2}\sigma_{b2012}} \right]^2 \right) db \Big)^{-1} = \frac{P_{2010} - p_n}{P_{2012} - p_n}. \quad (9)$$

В выражении (9) индекс «2010» относится к данным за 2010 год, а индекс «2012» — к данным за 2012 год. Полагаем, что при проверке инспектируемого объекта с нарушениями требований пожарной безопасности неизбежны штрафные санкции, тогда f — вероятность штрафных санкций для правонарушителей — определяется вероятностью инспекторской проверки объекта за год. На основании статистических данных с 2006 по 2012 год по Воронежской области средняя вероятность проверок плановых и внеплановых на объектах за год составляла: $f = 0,4770$. Тогда, значения $fH_{2010} = 0,792 \cdot 10^3$ руб. и $fH_{2012} = 3,787 \cdot 10^3$ руб., средние значения убытков от пожаров $u_{2010} = 114,69 \cdot 10^3$ руб., $u_{2012} = 237,3147 \cdot 10^3$ руб.

Дисперсия логнормального распределения величин убытков от пожаров, возникающих на хозяйственных объектах, вычислена методом квантиль-диаграмм [3]. Для оценки дисперсии использованы статистические данные по убыткам от пожаров на хозяйственных объектах в г. Воронеже за период 2007—2011 гг. Полученная оценка для значения дисперсии составляла $\sigma_u = 1,749$. Полагая, что дисперсия распределения величин убытков от пожаров в период с 2007 по 2012 гг. постоянно и равна дисперсии логнормального распределения величин прибыли от экономии на несоблюдении требований пожарной безопасности, т. е. $\sigma_{u2010} = \sigma_{u2012} = \sigma_u$, $\sigma_{b2010} = \sigma_{b2012} = \sigma_b$, причем $\sigma_u = \sigma_b = \sigma = 1,749$, а также, считая, что среднее значение B величины прибыли от экономии на несоблюдении требований пожарной безопасности собственниками объектов за указанные периоды неизменно, выражение (9) принимает вид

$$\left(\int_{fH_{2010}}^{\infty} \left(0,5 + 0,5 \operatorname{erf} \left\{ \frac{1}{\sqrt{2}\sigma} \right\} \times \ln \left[\frac{(1-p_{2010})(b-fH_{2010})}{P_{2010} u_{2010}} \right] \right) \right) \times \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma b} \cdot \exp \left(- \left[\frac{\ln b - \ln B}{\sqrt{2}\sigma} \right]^2 \right) db \times \quad (10)$$

$$\times \left(\int_{fH_{2012}}^{\infty} \left(0,5 + 0,5 \operatorname{erf} \left\{ \frac{1}{\sqrt{2}\sigma} \right\} \times \right. \right.$$

$$\begin{aligned} & \times \ln \left[\frac{(1-p_{2012})(b-fH_{2012})}{P_{2012}u_{2012}} \right] \Bigg\} \Bigg) \times \\ & \times \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma b}} \cdot \exp \left(- \left[\frac{\ln b - \ln B}{\sqrt{2}\sigma} \right]^2 \right) db = (10) \\ & = \frac{P_{2010} - P_n}{P_{2012} - P_n}. \end{aligned}$$

Из уравнения (10) определено значение величины средней прибыли от экономии на невыполнении требований пожарной безопасности собственниками объектов в Воронежской области в 2010 и 2012 гг., которая составляет $B = 2533$ рубля.

Тогда из выражения (4) для доли нарушителей требований пожарной безопасности среди собственников хозяйственных объектов на территории Воронежской области в 2010 и 2012 годах получены соответственно значения: $C_{2010} = 0,466$ и $C_{2012} = 0,271$.

Из формулы (2) определим значение регионального коэффициента пропорциональности k между вероятностью пожаров, обусловленных профилируемыми факторами и экономическим множителем C :

$$k = \frac{P_{2010} - P_n}{C_{2010}}. \quad (11)$$

Подставляя в формулу (11) соответствующие значения вероятностей и экономического множителя для Воронежской области в 2010 году, получим

$$k = \frac{P_{2010} - P_n}{C_{2010}} = \frac{0,014025 - 0,005}{0,466} \approx 0,019. \quad (12)$$

Определим величину средней прибыли от экономии на невыполнении требований пожарной безопасности собственниками объектов в Воронежской области за несколько лет до выхода Федерального закона «О внесении изменений в Кодекс Российской Федерации об административных правонарушениях по вопросам пожарной безопасности» от 03.06.2011 № 120-ФЗ, например в 2008 году.

Значение доли собственников хозяйственных объектов C_{2008} , экономивших на невыполнении требований пожарной безопасности в Воронежской области в 2008 году, можно определить из соотношения

$$C_{2008} = \frac{P_{2008} - P_n}{k}. \quad (13)$$

Учитывая, что вероятность возникновения пожаров на хозяйственных объектах Воронежской области в 2008 году составляет $p_{2008} = 0,016094$, и подставляя значения p_n и k получаем, что $C_{2008} = 0,584$. Из статистических данных значение $fH_{2008} = 0,818 \cdot 10^3$ руб., $u_{2008} = 87,783 \cdot 10^3$ руб. Тогда из уравнения

$$\begin{aligned} & \int_{fH_{2008}}^{\infty} \left(0,5 + 0,5 \operatorname{erf} \left\{ \frac{1}{\sqrt{2}\sigma} \times \right. \right. \\ & \times \ln \left[\frac{(1-p_{2008})(b-fH_{2008})}{P_{2008}u_{2008}} \right] \Bigg\} \Bigg) \times \\ & \times \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma b}} \cdot \exp \left(- \left[\frac{\ln b - \ln B}{\sqrt{2}\sigma} \right]^2 \right) db = C_{2008} \end{aligned} \quad (14)$$

получаем, что значение величины средней прибыли от экономии на невыполнении требований пожарной безопасности собственниками объектов в 2008 году составляет $B = 4388$ руб.

Выводы. Таким образом, на основании математической модели рационального правонарушителя требований пожарной безопасности разработаны алгоритмы нахождения величины C доли хозяйственных объектов с нарушениями требований пожарной безопасности и средней величины прибыли B от экономии на невыполнении требований пожарной безопасности.

С применением статистики пожаров, убытков и штрафов на хозяйственных объектах Воронежской области в период 2006—2012 гг. получены расчетные значения C и B в 2008, 2010 и 2012 годах.

Библиографический список

1. Оценка вероятности возникновения пожаров на основе математической модели, учитывающей факторы, определяющие долю нарушителей требований пожарной безопасности среди собственников объектов / С. Н. Тростянский [и др.] // Пожарная безопасность. — 2013. — № 2. — С. 86—91.
2. Белозеров, В. В. Модель оптимизации социально-экономических потерь от пожаров / В. В. Белозеров, Е. И. Богуславский, Н. Г. Топольский // Проблемы информационной экономики. Вып. VI. Моделирование инновационных процессов и экономической динамики: сб. науч. тр. / под ред. Р. М. Нижегородцева. — М.: ЛЕНАНД, 2006. — С. 226—247.

References

1. Ocenka veroyatnosti vozniknoveniya pozharov na osnovе matematicheskoj modeli, uchityvayushhej faktory, opredelyayushhie dolyu narushitelej trebovanij pozharnoj bezopasnosti sredi sobstvennikov ob'ektov / S. N. Trostyanskiy [i dr.] // Pozharnaya bezopasnost'. — 2013. — № 2. — S. 86—91.
2. Belozerov, V. V. Model' optimizacii social'no-e'konomicheskix poter' ot pozharov / V. V. Belozerov, E. I. Boguslavskij, N. G. Topol'skij // Problemy informacionnoj e'konomiki. Vyp. VI. Modelirovanie innovacionnyx processov i e'konomicheskoy dinamiki: sb. nauch. tr. / pod red. R. M. Nizhegorodceva. — M.: LENAND, 2006. — S. 226—247.

3. **Акимов, В. А.** Введение в статистику экстремальных значений и ее приложения / В. А. Акимов, А. А. Быков, Е. Ю. Щетинин. — М.: ФГУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2009. — 524 с.

3. **Akimov, V. A.** Vvedenie v statistiku ekstremal'nykh znachenij i ee prilozheniya / V. A. Akimov, A. A. Bykov, E. Yu. Shhetinin. — M.: FGU VNII GOChS (FC), 2009. — 524 s.

ESTIMATION ALGORITHMS OF MODEL PARAMETERS WITH ECONOMIC APPROACH TO THE PROBABILITY OF FIRES ON ECONOMIC FACILITIES USING VORONEZH REGION BY AN EXAMPLE

Zenin Yu. N.,

Voronezh Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia;
Russia, Voronezh, e-mail: vigps@mail.ru

Trostyanskij S. N.,

D. Sc. in Engineering, Assoc. Prof.,
Voronezh Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia;
Russia, Voronezh, tel.: (473)2363-305, e-mail: trostyansky2012@yandex.ru

Bakaeva G. A.,

PhD in Engineering, Assoc. Prof.,
Voronezh Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia;
Russia, Voronezh, e-mail: vigps@mail.ru

A mathematical model is used, describing the probability of fires on economic facilities, depending on economic and administrative factors that determine the share of fire safety requirements violators among the objects owners, created on the basis of the hypothesis of a rational offender. Algorithms are presented to estimate the share of fire safety requirements violators among the owners of economic objects at a particular place and time period who consider it profitable to violate fire safety requirements under the existing economic conditions, as well as the algorithm of an average amount of such savings. The algorithm application for the mentioned parameters definition is illustrated with the use of Voronezh region statistics of fires.

Keywords: mathematical modeling, fire safety, probability of fires, algorithm for model parameters estimation, rational offender model.

