ПОЖАРНАЯ ТАКТИКА, ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ И ТУШЕНИЯ

ВЫБОР И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПОКАЗАТЕЛЯ УРОВНЯ ЖИВУЧЕСТИ СИСТЕМЫ ПОЖАРОТУШЕНИЯ

В. Т. Аверьянов, кандидат военных наук.
Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России

Понятие живучести применительно к системе пожаротушения определяется как комплексное свойство системы, заключающееся в ее способности к функционированию в условиях опасных факторов пожара. В качестве показателя уровня живучести предлагается использовать отношение энтропии состояния системы и максимально возможной энтропии (рекорду), при наложенных на систему ограничениях. При этом живучесть определяется данным показателем, не убывает при эволюции системы, если относительное приращение энтропии системы не меньше относительного приращения рекорда. Определена тесная связь энтропии с традиционными показателями устойчивости системы.

*Ключевые слова:*система пожаротушения, живучесть, энтропия

THE LEVEL OF FRIE SUPPRESSION SYSTEM VITALITY BEHAVIOR SELECTION AND RESEARCH

V. T. Averyanov. Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia

The term of vitality as applied to firefighting means it`s ability to keep functioning in the conditions of frie. The relation between entropy of the system`s condition and the maximum possible entropy (the record) considering imposed restrictions is named an index of a vitality level . If the relative increment of entropy of the system is not less than relative increment of record vitality is defined by this index doesn`t decrease in conditions of evolution of the system.

Key words: fire suppression system, vitality, entropy

Система пожаротушения как динамический объект может находиться в самых разнообразных состояниях, которые допустимы для нее, исходя из целей функционирования. Все эти состояния могут проявляться в то время, когда структура или организация системы пожаротушения позволяет избегать деструктивных воздействий поражающих факторов пожара либо их локализовать.

Однако, если при воздействии поражающих факторах пожара система пожаротушения перейдет в недопустимое для нее состояние, то это равносильно ее гибели. Из этих достаточно общих рассуждений ясно: живучесть системы, а, следовательно, показатель уровня живучести, зависит от стратегии поведения системы пожаротушения в пространстве состояний.

Пусть множество $\{X < m >\}$n образует пространство допустимых состояний системы. В общем случае $X < m >$ может быть векторной случайной функцией $X < m > = X < m > (t) = < x_i (t), \ldots, x_m (t) >^{т}$.

Значение n определяется возможностями системы пожаротушения, ее ресурсными и целевыми ограничениями.

Очевидно, что система, находящаяся в произвольном j-м состоянии $x^j < m >$, является «живой», если справедливо $X^j < m > \{(t)\}_n \equiv \{X < m > (t), \ldots, X^n < m > (t)\}$.

Обозначим упрощенно через F_λ оператор воздействия с параметром λ (например, F–взрывы в газовых цехах, а λ – их плотность). Если воздействие взрывов сказывается на системе, находящейся в состоянии

$$X^i < m > (t) \in \{X< m > (t)\}_{n}, \; I = 1, \ldots, n;$$

а, например, $F_\lambda [X^i < m > (t)] \in \{X < m > (t)\}$ n, то мы можем говорить о том, что система «выжила» после воздействия с параметром λ. Если система имеет такую стратегию поведения и (или) так организована, что $\breve{A}_\lambda : F_\lambda [X^i < m > (t)] \in \{ X < m > (t) \} n$, то ясно, что уровень живучести такой системы очень высок. Следовательно, система будет иметь тем больший уровень живучести, чем больше мощность множества допустимых состояний и его разнообразия.

Эти требования отвечают закону У. Эшби, согласно которому только разнообразие допустимых состояний уменьшает разнообразие недопустимых.

Несомненно, что уровень живучести системы зависит также от «стремления» последней остаться, удержаться во множестве допустимых состояний [1]. Это стремление обеспечивается такими свойствами системы, как устойчивость.

По закону необходимого разнообразия множество вероятностей состояний системы, составляющих полную группу событий, может рассматриваться как соответствующее некоторому множеству, элементы которого обнаруживают разнообразие, характеризующее отличие друг от друга элементов конечного множества, то есть различия отношений порядка и элементов, и множества. Любой объект или систему можно рассматривать как определенное множество, обладающее разнообразием. Изменение этого разнообразия соответствует изменению состояний системы, то есть состава элементов, структуры или поведения системы. Множеству состояний системы можно таким образом составить обладающее эквивалентными свойствами множество вероятностей этих состояний.

Имея меру разнообразия состояний системы относительно ее состава, структуры и поведения, мы тем самым будем иметь характеристику живучести, поскольку, как было показано, живучесть системы зависит от этого разнообразия.

В качестве меры разнообразия в современной научной литературе принята энтропийная функция состояния системы. В ряде работ [2–4] прямо предлагается использовать энтропию системы в качестве меры организованности, живучести и уровня самоорганизации сложной системы.

Энтропия является мерой неопределенности состояния системы, мерой недостатка информации о действительной структуре и поведении системы. Увеличивая энтропию, мы тем самым увеличиваем неопределенность системы для органов управления ГПС, создаем для них информационный голод относительно действительной структуры и поведения системы.

Ватанабе С. показал, что в общем случае распознавание системы имеет наименьшую трудность для распознающей системы, если энтропия состояния распознаваемой системы минимальна. С другой стороны, справедливо утверждение, что для максимизации меры трудности различения системы на фоне среды необходимо максимизировать энтропию состояния системы до уровня энтропии среды.

В [5, 6] показано, что распределение ходов одного игрока для другого тем менее благоприятно, чем ближе это распределение к равномерному закону. Но именно равномерный закон распределения обеспечивает максимальное значение энтропии.

Если использовать энтропию в качестве величины, характеризующей уровень живучести системы, то она, учитывая общие свойства энтропийной функции, обладает следующими свойствами:

– энтропийная характеристика позволяет учесть неопределенность (незнание внутренней структуры и поведения) состояний системы для воздействующей стороны, аналитически выражается через вероятностные характеристики системы;

– энтропийная характеристика системы зависит от размерности пространства состояний системы, числа и разнообразия элементов системы, то есть отвечает закону необходимого разнообразия;

– энтропийная характеристика не зависит от выбора начала координат в пространстве состояний системы, так как энтропия инвариантна таким видам преобразований, как сдвиг, перемешивание и вращение.

Если определить состояние системы, соответствующее максимуму энтропии, то целесообразно измерять живучесть как относительную величину $G = \frac{H}{H_{\max}}; \quad 0 \le 1,$ (1)

где $H_{\max}$ – максимально возможная энтропия системы, характеризующая предельное, в условиях целевых и ресурсных ограничений, состояние неупорядоченности.

Таким образом, показатель живучести в виде (1) представляет собой отношение энтропии состояния системы к максимально возможной энтропии этой системы, в условиях наложенных на нее ограничений. Это означает, что энтропию нельзя рассматривать в отрыве от конкретной системы, от задач, связанных с использованием этой системы и ресурсов, которые выделены системе для функционирования. Если возникла потребность воспользоваться понятием энтропии, то следует четко определить, как ее можно измерить или описать распределение вероятностей или других метрик, связанных со свойствами системы и порождающих энтропию этой системы.

Отметим, что существование единственной максимальной меры, вообще говоря, не доказано. Но в то же время показано, что для всех рассмотренных к настоящему времени классов систем $H_{\max}$ существует и единственная. Работы в этом направлении ведутся преимущественно по пути поиска систем, для которых бы не существовало $H_{\max}$.. Примеров таких систем в настоящее время пока не найдено, поэтому достаточно уверенно можно утверждать, что таких систем нет, а если они будут обнаружены, то явятся весьма специфическими объектами математических исследований.

Из соотношения (1) видно, что определение показателя уровня живучести должно производиться по следующей схеме:

– определяется способ оценивания значения энтропии H в зависимости от конкретного типа системы;

– вычисляется значение H анализируемой системы;

– анализируются и формализуются ограничения, наложенные на систему;

– в рамках этих ограничений синтезируется система с параметрами, обеспечивающими $H_{\max}$;

– определяется значение показателя G.

Следовательно, перед тем как оценить значение показателя живучести, необходимо решить задачу синтеза этой системы по критерию максимума неопределенности в рамках имеющихся ограничений.

При заданных силах и средствах, а также условиях функционирования реализация принципа максимума неопределенности при тушении пожаров обеспечивает наименьшие потери (затраты) по сравнению с другими способами действий, и тем самым повышает живучесть подразделений при тушении пожаров.

С целью исследования основных свойств энтропийного показателя уровня живучести сложной системы (1) в дальнейшем для удобства максимально возможную при заданных ограничениях энтропию предлагается называть рекордом.

Применение любого показателя живучести, в том числе и энтропийного, предполагает возможность оценивания живучести, определения потерь живучести вследствие воздействия поражающих факторов пожара и определения значимости тех или иных элементов и связей системы. Для этого необходимо знать влияние всех составляющих системы на сам показатель живучести и их взаимное влияние друг на друга в процессе функционирования и эволюции системы.

Докажем справедливость следующего утверждения: уровень живучести системы G остается постоянным тогда и только тогда, когда относительное приращение энтропии равно относительному приращению рекорда.

Из (1) найдем $\frac{\partial G}{\partial Y}$, где Y – некоторый параметр системы

$$\frac{\partial G}{\partial Y} = \left(H_{\max} \cdot \frac{\partial H}{\partial Y} - H \cdot \frac{\partial H_{\max}}{\partial Y} \right) \cdot H_{\max}^{-2}.$$

В силу предположения о постоянстве G имеем $\frac{\partial G}{\partial Y} = 0$. Следовательно,

$$H_{\max} \cdot \frac{\partial H}{\partial Y} - H \cdot \frac{\partial H_{\max}}{\partial Y} = 0,$$

или

$$\frac{H'}{H} = \frac{H'_{\max}}{H_{\max}}, \qquad (2)$$

где

$$H' = \frac{\partial H}{\partial Y}; \quad H'_{\max} = \frac{\partial H_{\max}}{\partial Y}.$$

Пусть теперь справедливо (2). Из (1) найдем

$$\frac{\partial G}{\partial Y} = \left(H_{\max} \cdot H' - H \cdot H'_{\max} \right) \cdot H_{\max}^{-2}.$$

Но из (2) следует, что

$$H' \cdot H_{\max} - H \cdot H'_{\max} = 0.$$

Отсюда

$$\frac{\partial G}{\partial Y} = 0.$$

Следствие: при эволюции системы уровень ее живучести не меняется, если $H = H_{\max}$.

При реконструкции или развитии системы ее живучесть будет расти в том случае, если выполняются условия следующего утверждения: уровень живучести системы G растет тогда и только тогда, когда относительное приращение энтропии системы больше относительного приращения рекорда.

Пусть $\frac{\partial G}{\partial Y} > 0$. Учитывая, что

$$\frac{\partial G}{\partial Y} = \left(H_{\max} \cdot H' - H \cdot H'_{\max} \right) \cdot H_{\max}^{-2}, \qquad (3)$$

получим

$$H_{\max} \cdot H' > H \cdot H'_{\max}. \qquad (4)$$

Так как $H_{\max} > H > 0$ всегда, то из (4) получим

$$\frac{H'}{H} > \frac{H'_{\max}}{H_{\max}} \qquad (5)$$

Пусть теперь справедливо (5). Тогда из (3) и (5) следует, что справедливо

$$\frac{\partial G}{\partial Y} > 0.$$

Эти два утверждения объединяются в одно: живучесть системы не убывает при эволюции системы, если относительное приращение энтропии системы не меньше относительного приращения рекорда системы

$$\frac{H'}{H} \geq \frac{H'_{\max}}{H_{\max}}. \tag{6}$$

Таким образом, у системы, обладающей тенденцией к росту уровня живучести, ее энтропия всегда стремится в процессе эволюции к максимально возможной.

Этот принцип отвечает принципу максимума неопределенности состояния системы. Отметим, что этот принцип совпадает с принципом самоорганизации систем, полученным Г. Ферстером.

В зависимости от того, живучесть каких сторон системы мы рассматриваем, можно получить более конкретные свойства показателя живучести.

I. Предположим, что система организована так, что $H = const$ всегда. Следовательно, для выполнения (6) необходимо, чтобы выполнялось условие $H'_{\max} < 0$.

Таким образом, при $H = const$ у системы, стремящейся повысить свою живучесть в процессе эволюции, ресурсы должны использоваться на снижение рекорда, его приближение к *H*. То есть мы не меняем ни состав элементов системы (например, на принципиально новый), ни структуру системы, ни динамику ее функционирования, хотя ресурсы для этого есть. Их необходимо использовать для повышения, например, надежности элементов сложной системы (оперативный штаб оборудовать дополнительными средствами защиты, перевозки материально-технических средств автомобильным транспортом осуществлять под усиленной охраной и т.д.), ее структуры (ввести в штат пожарных частей новые, перспективные пожарные автомобили, заменить коротковолновые линии связи на линии УКВ спутниковой связи и т.д.).

Пусть для некоторой системы $H = 0$. Множество возможных состояний системы $\left\{X_{<m>}\right\}_n = \left\{x_{<1>}, \dots, x_{<m>}\right\}_n^T$ и множество недопустимых $\left\{X_{<m>}\right\}_k = \left\{x_{<1>}, \dots, x_{<m>}\right\}_k^T$ составляют вместе полную группу событий; в результате возможно, как уже отмечалось, сопоставить вероятные меры $P\left(\left\{X_{<m>}\right\}_n\right)$ и $P\left(\left\{X_{<m>}\right\}_k\right)$.

Рекорд системы можно определить как

$$H_{\max} = -P\left(\left\{X_{<m>}\right\}_n\right) \cdot \ln P\left(\left\{X_{<m>}\right\}_n\right) - P\left(\left\{X_{<m>}\right\}_k\right) \cdot \ln P\left(\left\{X_{<m>}\right\}_k\right).$$

Необходимо выполнить условие $H'_{\max} < 0$, что приведет к минимизации $H_{\max}$, так как по предложению $H = 0$. Из основных свойств энтропии [1] следует, что $H_{\max} = 0$ тогда и только тогда, когда все вероятности, кроме одной, равны нулю, а эта единственная равна I.

Таким образом, при $H = const$ и $H_{\max} > 0$ живучесть системы со временем будет возрастать, если мы при эволюции системы будем проводить мероприятия, которые привели бы к такому перераспределению вероятностей всех состояний системы, при котором только одно состояние, причем с минимальной вероятностью, отвечает положению системы, отождествленному с гибелью.

2. Пусть $H_{\max} = const$. Для выполнения (6) необходимо, чтобы $H' > 0$. То есть при $H_{\max} = const$ у системы, стремящейся повысить свою живучесть в процессе эволюции, энтропия должна возрастать, стремиться к рекорду. Это происходит, например, когда мы вводим дополнительные пути подвоза материальных средств, повышая при этом скрытность

функционирования системы.

Этот же принцип заложен в основе стратегии использования мобильных средств, например, автомобильного транспорта с запасами материально-технических средств. Так, одним из вариантов повышения живучести этой системы, с учетом использования автотранспорта, может быть вариант повышения уровня неопределенности местоположения транспортных средств с запасами материально-технических средств и ОТВ, передвигающихся по случайному закону не замкнутой дорожной цепи.

3. Если эволюция системы протекает так, что $H' > 0$ и $H'_{\max} > 0$ то, как легко видеть, этот случай является комбинацией двух предыдущих.

4. Если $H' > 0$, то поскольку $\lim H = H_{\max}$, из (6) следует, что для системы, уровень живучести которой не убывает в процессе эволюции, должно выполняться условие

$$\frac{H'}{H'_{\max}} > 1.$$

Таким образом, энтропия системы должна в этом случае расти быстрее, чем максимально возможная энтропия.

5. Если система такова, что $H' < 0$, то необходимо, как следует из (6), чтобы при этом выполнялось условие $H'_{\max} < 0$, что также приводит к общему условию

$$\frac{H'}{H'_{\max}} > 1.$$

Таким образом, в данном случае энтропия системы должна убывать медленнее, чем рекорд. Это требование отвечает условию обеспечения энтропийной устойчивости динамических систем, понятие о которой было введено В. Л. Строгановичем.

Рассмотрим этот вопрос подробнее.

В соответствии с [4,7] рассмотрим систему дифференциальных уравнений

$$\frac{dx_j}{dt} = f_j \cdot \left(x_1, ..., x_m, t\right), \; j = t, ..., m \;, \tag{7}$$

описывающих динамику системы.

Предположим, что правые части, то есть функции $f_j\left(x_1, \dots, x_m, t\right)$ непрерывные в некоторой открытой области, являются дифференцируемыми функциями своих аргументов.

При случайных начальных условиях частное решение (7) будет представлять собой случайные функции времени.

Обозначим плотность распределения этих функций в произвольный момент времени t как величину

$$\frac{dx_j}{dt} = f_j \cdot \left(x_1, ..., x_m, t\right) = \varphi. \tag{8}$$

Введем следующие, достаточно слабые допущения:

– φ – дифференцируемая по аргументам функции;

– $\varphi \cdot f_j\left(x_1, \dots, x_m, t\right) = 0 \quad \nabla\, x_j = \pm\infty, \; j = t, \dots, m$.

Энтропия системы (1, 4, 6) при (1, 4, 7) равна

$$H = -\int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} \varphi \ln \varphi dx_1 \dots dx_m = -M[\ln \varphi]. \tag{9}$$

Поскольку производная от математического ожидания равна математическому ожиданию производной, то из (9) получаем

$$\frac{dH}{dt}=-M\left[\frac{d\ln\varphi}{dt}\right]=-M\left[\frac{t}{\varphi}\frac{d\varphi}{dt}\right]=$$

$$=-\int_{-\infty}^{\infty}\ldots\int_{-\infty}^{\infty}\frac{d\varphi}{dt}dx_1\ldots dx_m= \tag{10}$$

$$=-\int_{-\infty}^{\infty}\ldots\int_{-\infty}^{\infty}\left(\sum_{j=1}^{m}\frac{d\varphi}{dx_j}\cdot\frac{dx_j}{dt}+\frac{d\varphi}{dt}\right)dx_1\ldots dx_m.$$

Интеграл от второго слагаемого в (10) равен нулю, поскольку

$$\int_{-\infty}^{\infty}\ldots\int_{-\infty}^{\infty}\varphi dx_1\ldots dx_m=t.$$

Тогда из (7) и (10) следует

$$\frac{dH}{dt}=-\sum_{j=1}^{m}\int\ldots\int\frac{d\varphi}{dx_j}f_j\left(x_1,\ldots,x_m,t\right)dx_1\ldots dx_m.$$

Учитывая второе допущение, получим

$$-\int_{-\infty}^{\infty}\ldots\int_{-\infty}^{\infty}\frac{dy}{dx_j}\cdot f_j\left(x_1,\ldots,x_m,t\right)dx_1\ldots dx_m=$$

$$=\varphi f_j\left(x_1,\ldots,x_m,t\right)\Big|_{-\infty}^{\infty}-\int_{-\infty}^{\infty}\ldots\int_{-\infty}^{\infty}\varphi\frac{\partial f_j\left(x_1,\ldots,x_m,t\right)}{\partial x_j}\cdot dx_1\ldots dx_m=$$

$$=-\int_{-\infty}^{\infty}\ldots\int_{-\infty}^{\infty}\varphi\frac{\partial f_j\left(x_1,\ldots,x_m,t\right)}{\partial x_j}\cdot dx_1\ldots dx_m.$$

Отсюда

$$\frac{dH}{dt}=-\sum_{j=1}^{m}\int\ldots\int\frac{d\varphi}{dx_j}f_j\left(x_1,\ldots,x_m,t\right)dx_1\ldots dx_m=\sum_{j=1}^{m}M\left[\frac{\partial f_j\left(x_1,\ldots,x_m,t\right)}{\partial x_j}\right].$$

Таким образом, для системы (7) справедливо

$$\frac{dH}{dt}=\sum_{j=1}^{m}M\left[\frac{\partial f_j\left(x_1,\ldots,x_m,t\right)}{\partial x_j}\right].$$

В соответствии с [4, 7] система (7) обладает общей монотонной энтропийной устойчивостью, если при произвольном начальном законе распределения координат общая энтропия системы монотонно убывает с течением времени.

В соответствии с полученным результатом, необходимым и достаточным условием общей монотонной энтропийной устойчивости системы (7) является выполнение условий

$$
\frac{dH}{dt} = \sum_{j=1}^{m} M\left[\frac{\partial f_j\left(x_1, \ldots, x_m, t\right)}{\partial x_j}\right] < 0, \tag{11}
$$

при произвольном начальном законе распределения.

Поскольку понятие живучести является важнейшей составной частью понятия устойчивости сложных систем, полученное условие (11) можно рассматривать применительно к оценке живучести системы, описываемой дифференциальными уравнениями (7).

Отметим, однако, что полученный результат не полностью совпадает с понятием устойчивости в классическом смысле. Система может обладать энтропийной устойчивостью, но в то же время быть неустойчивой в обычном смысле.

Выводы

1. Сформулированное в статье понятие живучести применительно к системе пожаротушения предлагается определять как комплексное свойство системы, заключающееся в ее способности к функционированию в условиях опасных факторов пожара.

Установлено, что система, реагирующая на воздействие факторов пожара по заранее определенному предписанию, сверхчувствительна к малейшим отклонениям условий функционирования от предусмотренных и не может обладать тем самым высоким уровнем живучести.

2. Определено, что уровень живучести системы пожаротушения при воздействии опасных факторов пожара зависит от мощности множества допустимых состояний системы и разнообразия этого множества и в целом отвечает закону необходимого разнообразия У. Эшби.

Исходя из этого, в качестве показателя уровня живучести предлагается использовать отношение энтропии состояния системы и максимально возможной энтропии (рекорду) при наложенных на систему ограничениях. При этом живучесть определяется данным показателем, не убывает при эволюции системы, если относительное приращение энтропии системы не меньше относительного приращения рекорда.

3. Определена тесная связь энтропии с традиционными показателями устойчивости систем. Получено, в частности, соотношение (4), показывающее взаимосвязь между изменением энтропии системы и параметрами дифференциальных уравнений, описывающих динамику сложной системы. Из этого соотношения получено условие (5) общей монотонной энтропийной устойчивости, выраженное через параметры дифференциальных уравнений.

Для использования предложенного подхода и оценивания уровня живучести необходимо оценить энтропию анализируемой системы и в рамках существующих на эту систему ограничений синтезировать систему, обладающую рекордом и оценить последний.

Проведенный анализ и полученные выводы доказывают правомочность использования энтропийного подхода для анализа живучести системы пожаротушения и введенного показателя для оценки уровня ее живучести.

Литература

1. Эшби У. Р. Принципы самоорганизации. – М.: Мир, 1966.
2. Петрушенко Л. А. Единство системности, организованности и самодвижения. – М.: Мысль, 1975.
3. Петров Ю. П. Информация и энтропия в кибернетике. – Л.: ЛГУ, 1989.
4. Шамбадаль П. Развитие и приложения понятия энтропии. – М.: Наука, 1967.
5. Постон Т., Стьюард Я. Теория катастроф и ее приложения. – М.: Мир, 1980.

6. Гилморр Р. Прикладная теория катастроф. – М.: Мир, 1984.
7. Рабочая книга по прогнозированию. – М.: Мысль, 1982.