

*И.В. Абрамов, Ю.В. Литвин*

(<sup>1</sup>ПАО "Газпром", <sup>2</sup>ООО "НИИгазэкономика"; e-mail: I.Abramov@adm.gazprom.ru)

## **ОЦЕНКА ЗАНЯТОСТИ ПОЖАРНЫХ БОЕВЫХ РАСЧЁТОВ И РИСКОВ ИХ НЕСВОЕВРЕМЕННОГО ПРИБЫТИЯ НА ОБЪЕКТ ЗАЩИТЫ**

*Расширен подход к оценке случайного времени прибытия пожарных боевых расчётов на объект защиты, времени их занятости и свободного горения. Получены некоторые количественные оценки с использованием рассмотренных аналитических методов и имитации.*

*Ключевые слова: время прибытия, риски, несвоевременное прибытие, время занятости.*

*I.V. Abramov, Yu.V. Litvin*

## **ASSESSMENT OF EMPLOYMENT OF FIRE-FIGHTING COMBAT CREWS AND RISKS OF THEIR UNTIMELY ARRIVAL ON SUBJECT TO PROTECTION**

*Approach to assessment of accidental arrival time of fire-fighting combat crews to protection objects, time of their employment and free burning is expanded. Some quantitative estimates with use of the considered analytical methods and imitations are received.*

*Key words: arrival time, risks, untimely arrival, busy time.*

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 3 февраля 2016 г.

### **Введение**

Несмотря на устойчивый тренд снижения числа пожаров в России, их количество все ещё находится на достаточно высоком уровне. В соответствии с официальной статистикой, в 2014 г. в России произошло 153 *тыс.* пожаров, в которых погибли около 10 *тыс.* человек [1]. К основным причинам возникновения пожаров традиционно относят [2]:

- несоблюдение правил пожарной безопасности (противопожарного режима);
- неосторожное обращение с огнём;
- неисправность электротехники и др.

В 2008 г. в целях защиты жизни, здоровья, имущества граждан и юридических лиц был принят Федеральный закон № 123 "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности" [3], определяющий основные показатели пожаровзрывоопасности, опасности веществ и материалов, пожароопасных и взрывоопасных зон, наружных установок и др. Статьей 76 Технического регламента установлены нормативные требования ко времени прибытия пожарных **боевых расчётов (БР)** на объекты защиты, составляющее 10 *мин.* для городских округов, и 20 *мин.* для сельской местности. Однако для конкретных объектов защиты и подрайонов выезда БР фактические показатели могут существенно отличаться, так как это время, как правило, зависит от множества различных случайных факторов (погодных и дорожных условий, занятости БР и др.), учесть которые в рамках одного норматива весьма проблематично.

Как известно, время прибытия БР на объект пожара во многом предопределяет длительность локализации и ликвидации пожара и конечный социально-экономический и материальный ущерб. Оценки времени прибытия и рисков возможного превышения установленных требований для БР **пожарных частей (ПЧ)** и пожарно-спасательных гарнизонов является важными условиями успешного планирования и принятия эффективных решений по организации пожарных служб.

Наряду с этим, важной задачей является оценка времени свободного развития горения на объекте пожара (до момента ввода первого ствола), а также общего времени занятости БР. Оценка данных показателей позволит определить длительность выполнения вызовов и, тем самым, обосновать необходимый состав сил и средств ПЧ или гарнизона.

Аналитическая оценка указанных времен является достаточно сложной задачей, для решения которой в настоящий момент используются различные статистические и имитационные модели при различных упрощающих предположениях [4-6]. В данной статье предложен подход к аналитической оценке времени прибытия и общего времени занятости БР при ликвидации пожаров на объектах защиты, позволяющий выполнить оценку загрузки сил и средств, с учётом возможного изменения ранга пожара при прибытии БР на объект.

### Сценарии прибытия БР на объект пожара

Будем рассматривать систему, стоящую из пожарной части и  $N$  объектов потенциально возможного возникновения пожара, входящих в район её ответственности (район выезда) [8, 9]. В момент поступления сообщения о пожаре дежурным диспетчером ПЧ определяется объект возникновения пожара, его место, а также предварительный ранг пожара. Пусть для тушения пожара заданного ранга выезжает несколько БР, количество и состав которых определяется установленным расписанием выездов и может быть представлено дискретной случайной величиной  $\nu_l$ , где  $l = \overline{1, 6}$  – ранг пожара<sup>1</sup>.

Как правило, после прибытия первого БР на объект **руководителем тушения пожара (РТП)** уточняется предварительно установленный ранг и принимается решение по дальнейшему привлечению новых или освобождению (направлению к местам дислокации) части прибывших на объект защиты БР. Выделим три сценария возможного развития процесса после прибытия первого БР на объект:

1. РТП сохраняет первоначально-установленный ранг пожара (с вероятностью  $\alpha_1$ ).
2. РТП снижает первоначально установленный ранг пожара (с вероятностью  $\alpha_2$ ).
3. РТП повышает первоначально установленный ранг пожара (с вероятностью  $\alpha_3$ ). Причём  $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1$ .

---

<sup>1</sup> Учитывается 5 рангов пожара, а также ранг "1-БИС"

В первом случае БР приступают к боевому развертыванию и последующей боевой работе на объекте. Во втором случае количество БР избыточно. В связи с этим часть БР возвращается к месту дислокации в ПЧ, а оставшиеся ведут подготовку и тушение пожара. В третьем случае прибывшие БР приступают к боевому развертыванию и тушению и на объект вызываются дополнительные силы и средства.

Ожидается, что учёт указанных сценариев в схеме расчёта позволит более точно оценить временные характеристики тушения пожара, занятости БР, а также времена их прибытия на объект защиты и др.

### Граф состояний процесса прибытия БР и ликвидации пожара

Процесс прибытия БР на объект и последующее тушение пожара является многофазным процессом со случайными временами выполнения каждой фазы. Граф соответствующих состояний представлен на рис. 1. Отметим, что предлагаемый граф существенно расширен, по сравнению с рассмотренными случаями в работах [5, 6]. В данном графе расширение множества возможных состояний процесса проведено путём добавления состояний, соответствующих тушению пожара при пониженном или повышенном ранге (после уточнения РТП).

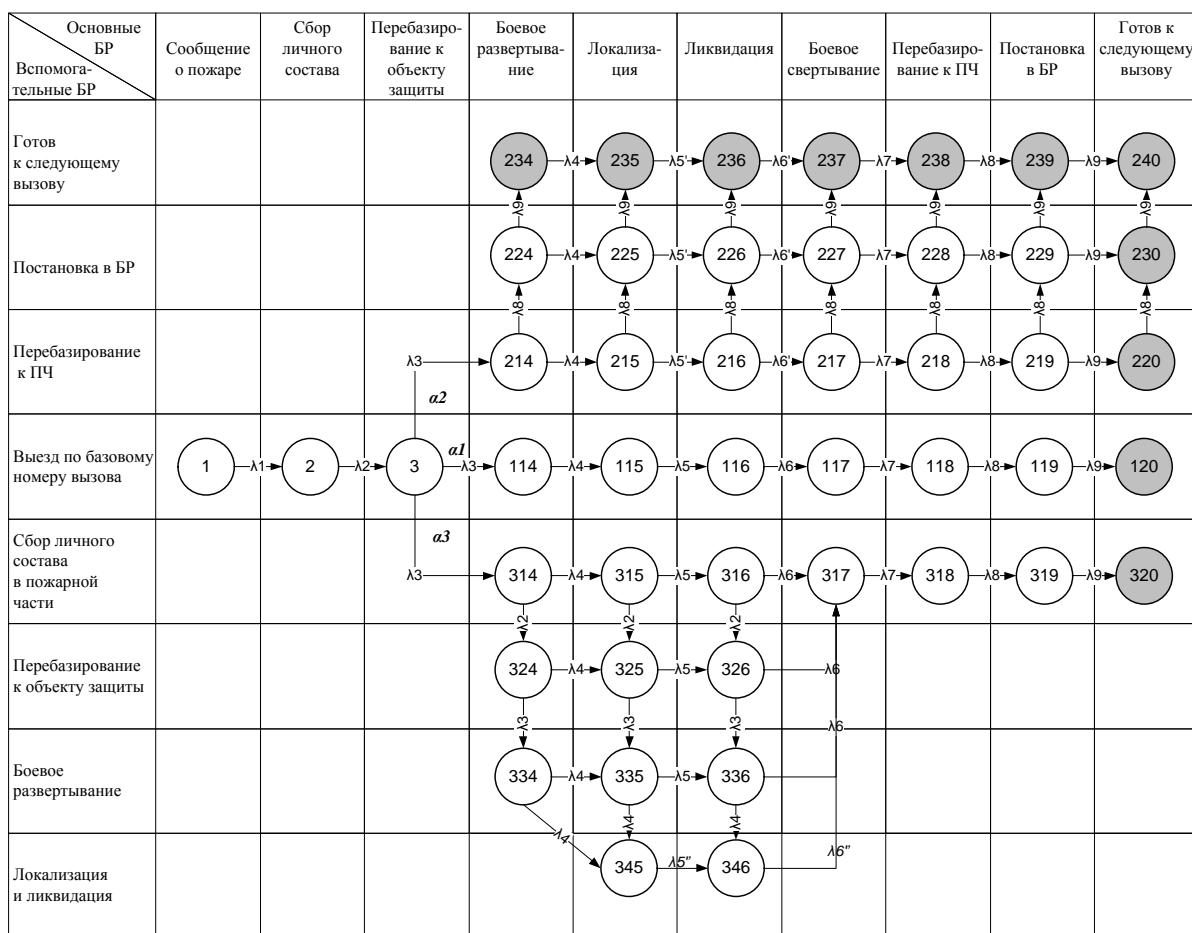


Рис. 1. Граф состояний процесса тушения пожара

Пронумеруем узлы графа, соответствующие состояниям до момента прибытия БР на объект, через  $k = 1, 2, 3$ . Состояния процесса после прибытия БР будем обозначать тремя индексами  $\{i r j\}$ , где  $i = 1, 2, 3$  – соответствуют установленному после прибытия РТП рангу пожара (1 – без изменений; 2 – понижение; 3 – повышение);  $r = 1, 2, 3, 4$  – состояниям дополнительных БР (отзываемых с объекта / вызываемых на объект защиты);  $j = 4, 5, \dots, 9$  – состояния процесса последующего тушения пожара и возврата БР в ПЧ.

Подмножество состояний  $\{i r 0\}$  является поглощающим. При попадании в него считается, что БР находятся в состоянии готовности к следующему вызову. Кроме того, как и в [5], предполагается, что времена пребывания процесса в отдельных состояниях являются случайными с показательными (экспоненциальными) законами распределения. Для более сложных законов и их комбинаций может использоваться имитация. Рассмотрим предлагаемый граф процесса тушения пожара более детально.

В режиме 1 (без изменения ранга пожара) процесс реализуется последовательно и проходит через все узлы подграфа 1: 1, 2, 3, 114 ..., 120.

В режиме 2 – пожар более низкого ранга – можно выделить два подграфа. Подграф 2 определяет процесс передислокации незадействованных БР в ПЧ (например, путь: 1, 2, 3, 21 $\bar{j}$ , ... 23 $\bar{j}$ , где  $j = \overline{4, 9}$ ), и подграф 3, структура которого совпадает со структурой подграфа 1 (например, путь: 1, 2, 3, 214 ... 220). Отметим, что интенсивности переходов процесса в подграфе 3 совпадают с интенсивностями переходов в подграфе 1 за исключением переходов между состояниями 2 $\bar{i}5$ , 2 $\bar{i}6$  и 2 $\bar{i}6$ , 2 $\bar{i}7$ , где  $i = \overline{1, 3}$ . Для отмеченных состояний средние времена локализации и ликвидации пожара снижаются в соответствии с уменьшением ранга. Поэтому интенсивности переходов в подграфе 3 ( $\lambda'_5$  и  $\lambda'_6$ ) не совпадают с интенсивностями  $\lambda_5$  и  $\lambda_6$  подграфа 1.

В режиме 3 пожар оказался более высокого ранга, чем был определён изначально. Времена перехода процесса между состояниями 31 $\bar{j}$ , 32 $\bar{j}$ , 33 $\bar{j}$ , где  $j = \overline{4, 6}$  при движении по графу вправо совпадают со временами перехода процесса между соответствующими состояниями подграфа 1. Времена перехода между состояниями 31 $\bar{j}$ , 32 $\bar{j}$ , 33 $\bar{j}$  при движении по графу вниз – определяются временами сбора, прибытия и боевого развёртывания дополнительных БР. Времена пребывания в состояниях 345 и 346 учитывают увеличение сил и средств, что ведёт к более интенсивной боевой работе ( $\lambda''_5$  и  $\lambda''_6$ ). Отметим, что переход в состояние 314 на графе соответствует появлению второй группы БР, которая вызывается РТП при повышении ранга пожара. Таким образом, начиная с состояния 314, граф становится двумерным: перемещения по горизонтальной оси соответствуют состояниям основной (прибывшей первой) группы БР, а по вертикальной – дополнительной группе БР, вызванной на объект после изменения ранга пожара.

В нижней части графа можно также выделить несколько подграфов. Подграф 4 определяет процесс тушения пожара, при котором дополнительные БР не успевают прибыть на объект до окончания его ликвидации. Данный подграф объединяет множество переходов между состояниями  $3rj$ , где  $r = \overline{1,3}$ ,  $j = \overline{4,6}$ . Особенностью данного подграфа является отсутствие каких-либо изменений в интенсивностях перехода при локализации и ликвидации пожара ( $\lambda_5$  и  $\lambda_6$ ), по сравнению с режимом 1.

Подграф 5 объединяет все возможные пути, проходящие через состояние 345. Особенностью данного подграфа является изменение интенсивностей локализации и ликвидации пожара ( $\lambda''_5$  и  $\lambda''_6$ ), вызванное дополнительно прибывшими БР.

Подграф 6 объединяет все возможные пути, включающие как состояние 336, так и состояние 346 (то есть не проходящие через состояние 345). Данный процесс соответствует режиму, при котором дополнительная группа БР прибывает на объект в момент ликвидации пожара (например, путь: 314, 315, 316, 326, 336, 346, 317, 318, 319, 320).

### **Определение характеристик вероятностных распределений процесса тушения пожара**

Для экспоненциальных (непрерывный случай) или геометрических распределений (дискретный случай) времени выполнения отдельных фаз процесса (рис. 1) поиск усреднённых длительностей тушения пожара может выполняться с использованием преобразования Лапласа или производящих функций моментов соответственно [7].

Рассматривая подграфы 1-6, можно увидеть, что общее время занятости БР определяется путём композиции ("свёртки") случайных времён пребывания процесса в каждой фазе [7].

При использовании преобразования Лапласа  $\tilde{f}(s)$  для суммы  $k$  экспоненциально распределённых случайных величин с параметрами  $\lambda_i$ , имеем:

$$\tilde{f}(s) = \prod_i^k \frac{\lambda_i}{s + \lambda_i}. \quad (1)$$

Применяя полученные соотношения, без особого труда можно вычислить начальные моменты ( $m^{(k)}$  – начальный момент  $k$ -го порядка), характеризующие искомые времена занятости БР [7].

Зная эти моменты, по известной формуле можно определить стандартное отклонение интересующего времени, характеризующее уровень риска. Рассмотрим подграф 1, полученный в случае тушения пожара в режиме 1. Используя (1), запишем:

$$\widetilde{\Phi}_1(s) = \widetilde{\varphi}(s) \times \prod_{i=4}^9 \frac{\lambda_i}{s + \lambda_i}, \quad (2)$$

где  $\widetilde{\varphi}(s) = \prod_{i=1}^3 \frac{\lambda_i}{s + \lambda_i}$ .

В (2) индекс  $i$  соответствует состоянию  $11i$  графа на рис. 1. Кроме этого,  $\widetilde{\varphi}(s)$  выделено в отдельный сомножитель.

Аналогичным образом были получены выражения преобразований Лапласа и для остальных состояний и режимов. Так, для подграфа 2 (режим 2), определяющего состояния БР, выехавшего на объект, но отправленного обратно в ПЧ после уточнения ранга по прибытии, имеем:

$$\tilde{\Phi}_2(s) = \tilde{\varphi}(s) \times \prod_{i=8}^9 \frac{\lambda_i}{s + \lambda_i}. \quad (3)$$

Для подграфа 3, определяющего состояния оставшихся на объекте БР, преобразование Лапласа будет иметь следующий вид:

$$\tilde{\Phi}_3(s) = \tilde{\varphi}(s) \times \frac{\lambda_4}{s + \lambda_4} \times \prod_{i=5}^6 \frac{\lambda'_i}{s + \lambda'_i} \times \prod_{i=7}^9 \frac{\lambda_i}{s + \lambda_i}. \quad (4)$$

Итоговое время занятости БР в режиме 2 будет складываться из времени возвращения в ПЧ отозванного с объекта БР (3), и времени прибытия в ПЧ, оставшихся на объекте БР (4):

$$\tilde{\Phi}_{23}(s) = \beta_1 \times \tilde{\Phi}_2(s) + (1 - \beta_1) \times \tilde{\Phi}_3(s), \quad (5)$$

где  $\beta_1 = \frac{k_1}{k_1 + k_2}$ ;

$k_1$  – количество БР, отозванных с объекта;

$k_2$  – количество оставшихся на объекте БР.

Наиболее сложная ситуация возникает при рассмотрении режима 3. Здесь, по аналогии с режимом 2, в ликвидации пожара участвуют две группы БР. Первая движется по состояниям 1, 2, 3, 314,...320 вправо, а вторая по состояниям 314,...320 вниз. Соответственно, и итоговое время занятости БР складывается из времён занятости этих двух групп.

Приведём преобразование Лапласа времени занятости первой группы БР.

$$\tilde{\Phi}'_4(s) = \pi_4 \times \tilde{\varphi}(s) \times \prod_{i=4}^9 \frac{\lambda_i}{s + \lambda_i}. \quad (6)$$

где  $\pi_4$  – вероятность прохождения процесса по состояниям подграфа 4.

Вероятность  $\pi_4$  в (6) может быть с лёгкостью получена путём перемножения вероятностей прохождения процесса по всем путям подграфа 4.

Аналогичные результаты могут быть получены и для подграфов 5 и 6:

$$\tilde{\Phi}'_5(s) = \pi_5 \times \tilde{\varphi}(s) \times \frac{\lambda_4}{s + \lambda_4} \times \prod_{i=5}^6 \frac{\lambda_i''}{s + \lambda_i''} \times \prod_{i=7}^9 \frac{\lambda_i}{s + \lambda_i};$$

$$\tilde{\Phi}'_6(s) = \pi_6 \times \tilde{\varphi}(s) \times \prod_{i=4}^5 \frac{\lambda_i}{s + \lambda_i} \times \frac{\lambda_6''}{s + \lambda_6''} \times \prod_{i=7}^9 \frac{\lambda_i}{s + \lambda_i}.$$

где  $\pi_5$  – вероятность прохождения процесса по состояниям 345, 346;

$\pi_6$  – вероятность прохождения процесса по состояниям 336 и 346.

Итоговое преобразование будет иметь вид:

$$\tilde{\Phi}'_{456}(s) = \tilde{\Phi}'_4(s) + \tilde{\Phi}'_5(s) + \tilde{\Phi}'_6(s).$$

Аналогичные рассуждения позволяют получить преобразования Лапласа для второй группы БР (вызываемой на объект после перехода процесса в состояние 314):

$$\begin{aligned}\tilde{\phi}''_4(s) &= \pi_4 \times \prod_{i=4}^9 \frac{\lambda_i}{s + \lambda_i}; \\ \tilde{\phi}''_5(s) &= \pi_5 \times \frac{\lambda_4}{s + \lambda_4} \times \prod_{i=5}^6 \frac{\lambda_i''}{s + \lambda_i''} \times \prod_{i=7}^9 \frac{\lambda_i}{s + \lambda_i}; \\ \tilde{\phi}''_6(s) &= \pi_6 \times \prod_{i=4}^5 \frac{\lambda_i}{s + \lambda_i} \times \frac{\lambda_6''}{s + \lambda_6''} \times \prod_{i=7}^9 \frac{\lambda_i}{s + \lambda_i}; \\ \tilde{\phi}''_{456}(s) &= \tilde{\phi}''_4(s) + \tilde{\phi}''_5(s) + \tilde{\phi}''_6(s).\end{aligned}$$

Таким образом, итоговое преобразование для режима 3 будет иметь вид:

$$\tilde{\phi}_{456}(s) = \beta_2 \times \tilde{\phi}'_{456}(s) + (1 - \beta_2) \times \tilde{\phi}''_{456}(s),$$

а преобразование Лапласа для всех возможных режимов:

$$\tilde{\phi}(s) = \alpha_1 \times \tilde{\phi}_1(s) + \alpha_2 \times \tilde{\phi}_{23}(s) + \alpha_3 \times \tilde{\phi}_{456}(s).$$

### Пример

Рассмотрим ПЧ, в которую поступают вызовы от обслуживаемых объектов. При поступлении вызова дежурным диспетчером уточняется месторасположение объекта, характер пожара и др. По полученным сведениям определяется предварительный ранг пожара, после чего на его ликвидацию направляются установленные расписанием выезды БР.

Пусть по прошлым статистическим данным получены усреднённые времена протекания процесса тушения пожара по фазам (табл. 1). Предполагается, что все времена пребывания процесса в отдельных состояниях, как было отмечено ранее, распределены по показательному закону. При этом в  $\alpha_1 = 70\%$  случаях тушение пожара происходит в соответствии с первоначально установленным рангом, в  $\alpha_2 = 20\%$  – по пониженному рангу, а в  $\alpha_3 = 10\%$  – по повышенному рангу.

Кроме этого, будем считать, что в режиме 2 средние времена локализации ( $1/\lambda'_5$ ) и ликвидации ( $1/\lambda'_6$ ) уменьшаются на 15%, а при повышении ранга (режим 3), в случае своевременного прибытия дополнительных БР, снижаются на 10%.

## Исходные данные

Наименование	Обозначение	Значение, мин.
Время до сообщения о пожаре	$1/\lambda_1$	7
Сбор личного состава в пожарной части	$1/\lambda_2$	1
Перебазирование к объекту	$1/\lambda_3$	8
Боевое развёртывание	$1/\lambda_4$	3
Локализация	$1/\lambda_5$	4
Ликвидация	$1/\lambda_6$	5
Боевое свёртывание	$1/\lambda_7$	3
Перебазирование к пожарной части	$1/\lambda_8$	9
Постановка в боевой расчёт	$1/\lambda_9$	8

Проведём оценку среднего значения ( $m^{(1)}$ ) и стандартного отклонения ( $\sigma$ ) времени занятости БР [7]. Проверка правильности проведённых расчётов выполняется путём сравнения результатов расчёта с имитацией (табл. 2).

Таблица 2

**Результаты вычислений среднего значения и стандартного отклонения  
времени занятости БР**

Режим	Обозначение	Время занятости, мин.	
		Аналитическая оценка	Имитация
Режим 1 (первоначальный ранг)	$m^{(1)}$	48,0	48,0
	$\sigma$	17,8	17,8
Режим 2 (пониженный ранг по прибытию)	$m^{(1)}$	39,8	39,9
	$\sigma$	18,5	18,1
Режим 3 (повышенный ранг по прибытию)	$m^{(1)}$	39,4	39,2
	$\sigma$	17,8	17,9
<b>Итоговые значения</b>	$m^{(1)}$	<b>45,5</b>	<b>44,3</b>
	$\sigma$	<b>18,3</b>	<b>18,4</b>

Проведём оценку времени прибытия первой группы БР на объект, а также времени свободного горения (до начала локализации). Результаты, приведённые в табл. 3, позволяют утверждать, что первый БР прибывает на объект за установленное время в  $P(t_{приб} \leq t_{норм}) = 30\%$  случаев (при  $t_{норм} = 10$  мин. для городских поселений). Полученный результат свидетельствует о существенном нарушении норм Технологического регламента и требует внесения изменений в организационные механизмы функционирования ПЧ.

Таблица 3

**Результаты вычислений времени прибытия первой группы БР  
и времени свободного горения**

Показатель	Обозначение	Временная оценка, мин.	
		Аналитическая оценка	Имитация
Время до прибытия первого БР	$m^{(1)}$	16,0	16,0
	$\sigma$	10,4	10,4
Время свободного горения	$m^{(1)}$	19,0	19,7
	$\sigma$	11,1	11,3



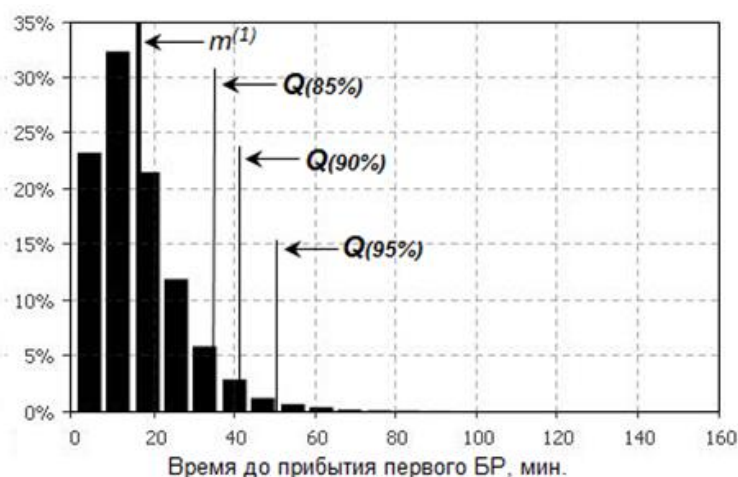


Рис. 3. Распределение времени до прибытия первого БР:  
 $Q$  – квантили

Таким образом, в настоящей статье предложен аналитический подход к оценке времени занятости БР, а также прибытия сил и средств на объект защиты в простейших предположениях о функциях распределений времён пребывания процесса тушения пожара в отдельных состояниях, существенно расширяющий ранее рассмотренные модели. Приведены аналитические формулы расчёта моментов распределений для случая изменения ранга пожара по прибытию первого БР. Полученные результаты хорошо согласуются с имитацией. Продемонстрирована возможность получения вероятностных характеристик исследуемых процессов, используя имитационное моделирование.

### Литература

1. **Официальная** статистика МЧС России. <http://www.mchs.gov.ru>.
2. **Самойлов Д.Б., Песикин А.Н. и др.** Справочник инженера по пожарной охране: учеб.-практ. пособие. М.: "Инфра-Инженерия", 2005. 768 с.
3. **Федеральный** закон РФ от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности".
4. **Бутырин О.В., Абаев А.В.** Технология оценивания эффективности функционирования системы обеспечения пожарной безопасности промышленных предприятий. Иркутск: ИрГУПС, 2010. 132 с.
5. **Теребнев В.В., Теребнев А.В.** Управление силами и средствами на пожаре: учеб. пособие. М.: Академия ГПС МЧС России, 2003. 261 с.
6. **Феллер В.** Введение в теорию вероятностей и её приложения. Т. 2. Пер. с англ. М.: Мир, 1984. 738 с.
7. **Приказ** МЧС России от 25 марта 2009 г. № 181 "Об утверждении свода правил "Места дислокации подразделений пожарной охраны. Порядок и методика определения".
8. **Приказ** МЧС России от 5 мая 2008 г. № 240 "Об утверждении Порядка привлечения сил и средств подразделений пожарной охраны, гарнизонов пожарной охраны для тушения пожаров и проведения аварийно-спасательных работ".