

УДК 696.2

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ ВЗРЫВОВ БЫТОВОГО ГАЗА В  
КВАРТИРАХ В ТЕЧЕНИЕ ВРЕМЕНИ  $t$  ИЗ-ЗА АВАРИЙ НА  
ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ПУНКТАХ**

**д.т.н., проф. А.П. Ковалёв, асп. И.И. Лехтман**  
*Донецкий национальный технический университет*

**Постановка проблемы.** Аварии на газораспределительных пунктах ГРП могут являться причиной аварийного перехода газа, эксплуатирующегося под высоким давлением (свыше 0,3 до 1,2 МПа) в трубопровод среднего (свыше 0,005 до 0,3 МПа). Это, в свою очередь, приводит к выходу из строя газовой арматуры на трубопроводе среднего давления, что может вызвать нарушение технологического процесса на промышленных предприятиях и даже остановку производства. Переход газа из трубопровода среднего давления (свыше 0,005 до 0,3 МПа) в трубопровод низкого (до 5 кПа) может спровоцировать отрыв пламени от горелок газовых печей, установленных в квартирах, что может послужить причиной загазирования помещения до взрывоопасной концентрации (5-15%) и при наличии экзогенного источника сопровождается взрывом.

В результате взрыва бытового газа 13 октября 2007 года в Днепропетровске в 10-этажном доме погибло 23 человека, в том числе 7 детей. Одна из основных версий загазирования квартиры, а затем и взрыва, по словам генерального директора ООО Днепрогаз И. Иванова – резкое повышение давления газа в сети.

Резкое повышение давления газа в квартирных сетях может произойти из-за аварии на газораспределительном пункте (ГРП) и тогда газ под давлением в 300 кПа без редуцирования (снижения давления регулятором), переходит в трубопровод жилого дома, где максимально допустимым является давление в 3 кПа. В результате такого аварийного перехода возможен отрыв пламени горелки в помещение кухни, вследствие чего пламя гаснет, и газ продолжает поступать в квартиру. При концентрации метана в воздухе от 5 до 15% образуется гремучая смесь, способная взрываться при случайном появлении экзогенного источника [1].

Поэтому проблема, связанная с определением вероятности появления взрывов бытового газа в квартирах в течение времени  $t$  из-за аварий на ГРП является актуальной научной задачей, решение которой позволит ответить на вопрос: возможен или невозможен взрыв в квартирах из-за аварий на ГРП.

**Цель работы.** Определить вероятность взрывов бытового газа в квартире из-за аварий на ГРП.

Взрыв бытового газа в квартире может произойти при случайном совпадении в пространстве и времени трёх событий: произошёл отказ в системе регулятора давления (резко повысилось давление газа на выходе регулятора); отказал в срабатывании сбросной клапан, который сбрасывает избыток газа в атмосферу при повышении давления на выходе регулятора на 15%); отказал в срабатывании предохранительно-запорный клапан (срабатывает при повышении давления газа в трубопроводе на 25%).

Будем предполагать, что источник инициирования взрывов в квартире существует постоянно (коммутация выключателя, искрение в розетке при работе холодильника из-за наличия ослабленных и искрящих контактных соединений, курение и т.д.).

Вероятность взрывов в квартире в течение времени  $t$  при этих допущениях можно определить из следующей системы уравнений, записанной в матричной форме [2]:

$$\dot{P}(t) = P(t) \cdot A, \quad (1)$$

где

$\dot{P}(t) = [P_i(t)]_{i=1}^7$  – вектор-строка;

$P(t) = [P_i(t)]_{i=1}^7$  – вектор-строка.

Система уравнений (3) решается при начальных условиях:  $P_1(0)=1$ ,  $P_2(0)=0$ ,  $P_3(0)=0$ ,  $P_4(0)=0$ ,  $P_5(0)=0$ ,  $P_6(0)=0$ ,  $P_7(0)=0$ .

Матрица  $A$  имеет вид:

$$A = \begin{pmatrix} -\alpha_1 & \lambda_1 & \lambda_2 & \lambda_3 & 0 & 0 & 0 \\ \mu_1 & -\alpha_2 & 0 & 0 & \lambda_3 & 0 & \lambda_2 \\ \mu_2 & 0 & -\alpha_3 & 0 & 0 & \lambda_3 & \lambda_1 \\ \mu_3 & 0 & 0 & -\alpha_4 & \lambda_1 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & \mu_3 & 0 & \mu_1 & -\alpha_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mu_3 & \mu_2 & 0 & -\alpha_6 & 0 \\ 0 & \mu_2 & \mu_1 & 0 & 0 & 0 & -\alpha_7 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где  $\alpha_1 = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3$ ;  $\alpha_2 = \mu_1 + \lambda_2 + \lambda_3$ ;  $\alpha_3 = \lambda_1 + \mu_2 + \lambda_3$ ;  $\alpha_4 = \lambda_1 + \lambda_2 + \mu_3$ ;

$\alpha_5 = \mu_1 + \lambda_2 + \mu_3$ ;  $\alpha_6 = \lambda_1 + \mu_2 + \mu_3$ ;  $\alpha_7 = \mu_1 + \mu_2 + \lambda_3$ ;

$\lambda_1 = \frac{1}{\bar{d}_1}$ ;  $\bar{d}_1$  – средний интервал времени между отказами регулятора давления;

$\mu_1 = \frac{1}{d_1}$ ;  $d_1$  – среднее время нахождения регулятора давления в необна-

руженном отказавшем состоянии;

$\lambda_2 = \frac{1}{\bar{d}_2}$ ;  $\bar{d}_2$  – средний интервал времени между отказами в срабатывании сбросного клапана;

$\mu_2 = \frac{1}{d_2}$ ;  $d_2$  – среднее время нахождения сбросного клапана в необна-  
руженном отказавшем состоянии;

$\lambda_3 = \frac{1}{d_3}$ ;  $\bar{d}_3$  – средний интервал времени между отказами в срабатывании предохранительно-запорного клапана;

$\mu_3 = \frac{1}{d_3}$ ;  $d_3$  – среднее время нахождения предохранительно-запорного клапана в необнаруженном отказавшем состоянии.

В том случае, если заданы интервалы времени  $\theta_i$  между диагностиками регулятора давления, отсекателя мгновенного действия и сбросного клапана, то  $\bar{\mu}_i$ , где  $i = 1, 3$ , вычисляются следующим образом [3]:

$$\mu_i = \frac{1}{\theta_i - \frac{1}{\lambda_i} \left[ 1 - \exp \left[ -\lambda_i \theta_i \right] \right]}. \quad (3)$$

В том случае, если  $\lambda_i \cdot \theta_i < 0,1$ , тогда:

$$\mu_i = \frac{2}{\lambda_i \cdot \theta_i^2}. \quad (4)$$

Вероятность взрывов в квартире бытового газа за время  $t$  находим из решения системы линейных дифференциальных уравнений (1) численными методами

$$F(t) = 1 - \sum_{i=1}^7 P_i(t). \quad (5)$$

Среднее время до взрыва бытового газа в квартире найдём, пользуясь системой алгебраических уравнений [2]:

$$\begin{pmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \tau_4 \\ \tau_5 \\ \tau_6 \\ \tau_7 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_1 & -\lambda_1 & -\lambda_2 & -\lambda_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\mu_1 & \alpha_2 & 0 & 0 & -\lambda_3 & 0 & -\lambda_2 \\ -\mu_2 & 0 & \alpha_3 & 0 & 0 & -\lambda_3 & -\lambda_1 \\ -\mu_3 & 0 & 0 & \alpha_4 & -\lambda_1 & -\lambda_2 & 0 \\ 0 & -\mu_3 & 0 & -\mu_1 & \alpha_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\mu_3 & -\mu_2 & 0 & \alpha_6 & 0 \\ 0 & -\mu_2 & -\mu_1 & 0 & 0 & 0 & \alpha_7 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где  $\tau_i$ ,  $i = \overline{1, 7}$  – среднее время до взрыва бытового газа в квартире, если в начальный момент времени система находилась в состоянии 1, т.е. в начальный момент времени регулятор давления, сбросной и предохранительно-запорный клапаны находятся в работоспособном состоянии.

В нашем случае из системы алгебраических уравнений (6) находим  $\tau_1$ .

В том случае, если выполняется условие:  $\lambda_i \leq 0,01\mu_i$ ,  $i = \overline{1,3}$  то, используя систему алгебраических уравнений (6) и формулу (4), находим среднее время до взрыва в квартире  $\tau_I$ :

$$\tau_I = \frac{4}{\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot (\lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \theta_2^2 \cdot \theta_3^2 + \lambda_1 \cdot \lambda_3 \cdot \theta_1^2 \cdot \theta_3^2 + \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \theta_1^2 \cdot \theta_2^2)}. \quad (7)$$

В том случае, если  $\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = \theta$ , тогда формулу (7) можно записать в виде:

$$\tau_I = \frac{4}{\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \theta^4 \cdot (\lambda_3 \cdot (\lambda_1 + \lambda_2) + \lambda_1 \cdot \lambda_2)}. \quad (8)$$

Дисперсию  $\sigma^2$  времени до взрыва в квартире находим из следующей системы уравнений, записанной в матричной форме [2]:

$$\begin{pmatrix} \sigma_1^2 \\ \sigma_2^2 \\ \sigma_3^2 \\ \sigma_4^2 \\ \sigma_5^2 \\ \sigma_6^2 \\ \sigma_7^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \alpha_1 & -\lambda_1 & -\lambda_2 & -\lambda_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\mu_1 & \alpha_2 & 0 & 0 & -\lambda_3 & 0 & -\lambda_2 \\ -\mu_2 & 0 & \alpha_3 & 0 & 0 & -\lambda_3 & -\lambda_1 \\ -\mu_3 & 0 & 0 & \alpha_4 & -\lambda_1 & -\lambda_2 & 0 \\ 0 & -\mu_3 & 0 & -\mu_1 & \alpha_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\mu_3 & -\mu_2 & 0 & \alpha_6 & 0 \\ 0 & -\mu_2 & -\mu_1 & 0 & 0 & 0 & \alpha_7 \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \tau_4 \\ \tau_5 \\ \tau_6 \\ \tau_7 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \tau_4 \\ \tau_5 \\ \tau_6 \\ \tau_7 \end{pmatrix} \quad (9)$$

Из полученной системы уравнений (9) находим дисперсию  $\sigma_1^2$  времени до взрыва в квартире, если в начальный момент времени регулятор давления, сбросной клапан и предохранительно-запорный клапан находятся в работоспособном состоянии.

В том случае, если при решении системы уравнений (6) и (9) получим, что  $\tau_I \approx \sigma_1$ , тогда вероятность взрывов в квартире бытового газа в течение времени  $t$  определим следующим образом:

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau_I}\right)\right] \quad (10)$$

Используя полученные формулы, представляется возможность оценить вероятность загазирования квартиры в течение времени  $t$  из-за аварий на ГРП.

**Пример 1.** Аварийный переход газа, эксплуатирующегося под средним давлением (5кПа - 0,3Мпа) в трубопровод низкого (до 5кПа) может произойти при совпадении в пространстве и времени следующих случайных событий: произошел отказ в системе регулятора давления (не произошло снижение

входного давления); отказал в срабатывании сбросной клапан; отказал в срабатывании предохранительно-запорный клапан.

**Дано:**

$\bar{d}_1 = 7,6$  год – средний интервал времени между отказами в срабатывании предохранительно-запорного клапана;

$\theta_1 = 0,167$  год – интервал времени между проверками работоспособности предохранительно-запорного клапана;

$\bar{d}_2 = 4,85$  год – средний интервал времени между отказами регулятора давления;

$\theta_2 = 0,019$  год – интервал времени между проверками регулятора давления;

$\bar{d}_3 = 13,3$  год – средний интервал времени между отказами в срабатывании сбросного клапана;

$\theta_3 = 0,167$  год – интервал времени между проверками работоспособности сбросного клапана;

Определить вероятность загазирования квартиры в течение года в результате аварийного попадания газа из трубопровода среднего давления, в котором газ находится под давлением до 300 кПа в трубопровод низкого давления (ввод в жилой дом), где максимально допустимое значение давления газа составляет 3 кПа.

а) используя систему уравнений (1), матрицу (2) и формулы (3) – (5), найти  $F(t)$ ;

б) используя систему уравнений (6) и (9), определить  $\tau_1$  и  $\sigma_1^2$  если  $\tau_1 \approx \sigma_1$  по формуле (10) находим  $F(t)$ ;

в) найти  $\tau_1$  по формуле (7), используя (10), найти  $F(t)$ ;

г) сравнить полученные результаты расчётов тремя различными способами.

### Решение

Используя исходные данные примера, формулу (3), находим:

$$\lambda_1 = \frac{1}{d_1} = \frac{1}{7,6} = 0,132 \text{ 1/год}; \mu_1 = \frac{1}{0,167 - \frac{1}{0,132} \cdot \exp[-0,132 \cdot 0,167]} = 549 \frac{1}{\text{год}};$$

$$\lambda_2 = \frac{1}{d_2} = \frac{1}{4,85} = 0,206 \text{ 1/год}; \mu_2 = \frac{1}{0,019 - \frac{1}{0,206} \cdot \exp[-0,206 \cdot 0,019]} = 2,69 \cdot 10^4 \text{ 1/год};$$

$$\lambda_3 = \frac{1}{d_3} = \frac{1}{13,3} = 0,075 \text{ 1/год}; \mu_3 = \frac{1}{0,167 - \frac{1}{0,075} \cdot \exp[-0,075 \cdot 0,167]} = 957,8 \text{ 1/год};$$

а) используя полученные данные, систему уравнений (1), матрицу (2), формулы (3) - (5), получим:  $F(1) = 4,65 \cdot 10^{-9}$ ;

б) используя исходные данные примера, систему уравнений (6) и (9), год находим  $\tau_1 = 2,14 \cdot 10^8$  год и  $\sigma_1^2 = 4,5 \cdot 10^{16}$  год<sup>2</sup>, так как  $\tau_1 = \sigma_1$  с помощью формулы (10) находим  $F(1) = 4,67 \cdot 10^{-9}$ ;

в) используя формулу (7), находим  $\tau_1 = 2,42 \cdot 10^8$  год. Подставив  $\tau_1$  в формулу (10) вычислим  $F(1) = 4,15 \cdot 10^{-9}$ ;

г) из сравнения результатов видно, что приближенный и точный методы для исходных данных примера дают практически один и тот же результат.

**Пример 2.** Определить вероятность загазирования квартиры в течение года, в случае, когда предохранительно-сбросной клапан, предохранительно-запорный клапан и регулятор давления не обслуживаются (не проверяется их работоспособность) в процессе эксплуатации, т.е.  $\mu_1 \rightarrow 0$ ,  $\mu_2 \rightarrow 0$ ,  $\mu_3 \rightarrow 0$ . Для расчетов использовать исходные данные примера 2.

#### Решение

Используя систему уравнений (1) и матрицу (2), формулы (3) – (5), находим  $F(1) = 5,96 \cdot 10^{-4}$ .

Считается, что если вероятность появления нежелательного события  $F_0(1) \leq 1 \cdot 10^{-6}$  [4], то такое событие будет маловероятным. Полученное значение  $F(1) \leq 5,96 \cdot 10^{-4}$  не является таковым.

#### Выводы

1. Системы уравнений (3), (8), (11) можно применить также для оценки взрывобезопасности газифицированных промышленных предприятий.

2. В том случае, если контроль состояния оборудования проводить в соответствии с существующими инструкциями по эксплуатации, то вероятность загазирования квартиры в течение года из-за аварий на ГРП будет величина маловероятная  $F(1) = 4,65 \cdot 10^{-9}$ , а это означает, что загазирование помещений происходит исключительно по вине человека, проживающего в квартире, либо из-за плохого состояния арматуры и газовых сетей.

3. Если в процессе эксплуатации оборудования на ГРП не проверяется (не диагностируется) его состояние, тогда вероятность загазирования квартиры в течение года увеличивается на несколько порядков и становится равной  $F(1) = 5,96 \cdot 10^{-4}$ , а это означает, что имеет место загазирование квартиры из-за аварии на ГРП, что и произошло в Днепропетровске.

4. Чтобы исключить случаи загазирования квартиры из-за аварий на ГРП, экономически целесообразно на вводе в каждую квартиру многоэтажно-

го дома установить клапан-отсекатель, который будет реагировать на повышение давления газа на вводе в квартиру, и перекрывать подачу газа в аварийных режимах. Стоимость такого клапана не будет превышать 200 гривен (разработка ДонНТУ).

#### **ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА**

1. Сухарев М. Г. Надёжность систем газоснабжения. Справочник/Под ред. М. Г. Сухарева (в двух книгах) – М.: Недра 1984 кн. 1 – 414 с., кн. 2 – 288 с.
2. Ковалев А. П., Лехтман И. И., Вьюнов В. П. Об оценке взрывобезопасности квартир, эксплуатирующих бытовой газ – Збірник наукових праць Донецького національного технічного університету. Сер. «Електротехніка і енергетика» 2009, № 9.
3. Ковалев А. П. Оценка пожарной безопасности передвижных трансформаторных подстанций 110/35/6 кВ /А. П. Ковалев, А. В. Шевченко, И. В. Белоусенко //Промышленная энергетика – 1991. – №6 – с.28 – 31.
4. ГОСТ 12.1.004 – 91. Пожарная безопасность. Общие требования – М: Изд-во стандартов, 1991.