

Научная статья

УДК 614.849; DOI: 10.61260/1998-8990-2023-3-96-105

## **КРИТЕРИАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ УРОВНЯ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**

✉Тимошенко Артем Леонидович;

Самигуллин Гафур Халафович.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

✉[artem18181@gmail.com](mailto:artem18181@gmail.com)

*Аннотация.* Работа посвящена решению проблемы обеспечения пожарной безопасности путем количественной оценки уровня пожарной опасности при эксплуатации технологического оборудования, в котором используется, транспортируется или хранится водородсодержащий газ. К таким технологическим участкам преимущественно относятся: склады для хранения емкостей с водородом, электролизные цеха, помещения, в которых размещены ресиверы для водорода, водородные компрессорные станции и т.п. В работе представлен перечень показателей пожарной опасности газообразного водорода, описаны способы определения данных показателей (параметров критериальной модели) для технологического участка, на основе разработанной программы для электронной вычислительной машины предложен метод отнесения технологического объекта к определенной категории уровня пожарной опасности. Данная модель применима только для закрытых технологических площадок, на которых размещены аппараты и (или) трубопроводы, в которых обращается водородсодержащий газ с чистотой не менее 99,9 %.

*Ключевые слова:* водородное оборудование, водородсодержащий газ, параметры критериальной модели, допустимые значения, технологический участок, категория уровня пожарной опасности

**Для цитирования:** Тимошенко А.Л., Самигуллин Г.Х. Критериальная модель оценки уровня пожарной опасности технологического оборудования водородной энергетики // Проблемы управления рисками в техносфере. 2023. № 3 (67). С. 96–105. DOI: 10.61260/1998-8990-2023-3-96-105.

Scientific article

## **CRITERIA MODEL ASSESSMENT OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT FIRE HAZARD LEVEL IN HYDROGEN POWER INDUSTRY**

✉Timoshenko Artem L.;

Samigullin Gafur Kh.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia

✉[artem18181@gmail.com](mailto:artem18181@gmail.com)

*Abstract.* The work is aimed at the solving the problem of fire safety by quantitative risk assessment during the operation of process equipment where hydrogen-containing gas is used, transported or stored. Such process areas mainly include hydrogen storage tanks, electrolysis plants, rooms containing hydrogen receivers, hydrogen compressor stations, etc. The list of hydrogen gas fire hazard indicators is presented in the work, the ways of definition of these indicators (parameters of criterial model) for a technological site are described, on the basis of the developed program

for electronic computing machine the method of reference of technological object to a certain risk category is offered. This model is applicable only for closed technological sites where apparatuses and (or) pipelines in which hydrogen-containing gas with purity not less than 99,9 % is circulating are placed.

*Keywords:* hydrogen equipment, hydrogen-containing gas, criteria model parameters, allowable values, process area, risk categories

**For citation:** Timoshenko A.L., Samigullin G.Kh. Criteria model assessment of technological equipment fire hazard level in hydrogen power industry // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2023. № 3 (67). P. 96–105. DOI: 10.61260/1998-8990-2023-3-96-105.

## Введение

В настоящее время водородсодержащий газ (ВСГ) широко используется в различных отраслях промышленности, причем с увеличением производственных нужд увеличивается объемы его производства [1]. По прогнозам компании по анализу данных и консалтингу GlobalData, глобальные мощности по производству «низкоуглеродного» водорода с большой вероятностью достигнут 14 млн т в год к 2030 г., что в 20 раз больше, чем на сегодняшний день (рис. 1) [2].

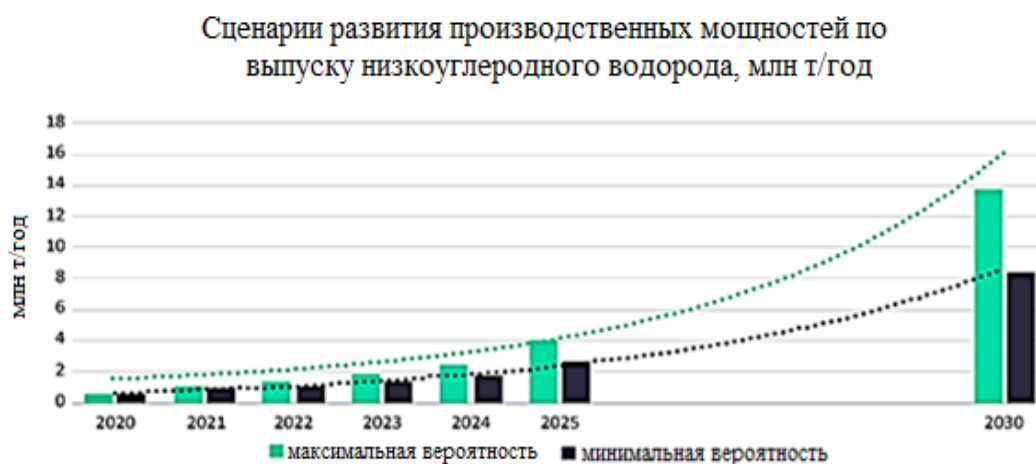


Рис. 1. Сценарии наращивания мощностей низкоуглеродного водорода, млн т

С развитием производственной водородной инфраструктуры наблюдается параллельное развитие автоматизированных систем управления технологическим процессом (АСУ ТП), в связи с чем происходит последовательное усложнение задач, стоящих перед системами управления от управления отдельными установками и параметрами, к автоматизации процессом в целом. Применение современных АСУ ТП дает возможность не только с высокой эффективностью реализовывать контроль и управление на производстве, но и отчасти избежать человеческих ошибок в оперативном управлении. К актуальным вопросам в данном случае относят вопросы развития интеллектуальных технологий АСУ ТП в направлении разработки алгоритмов реагирования на возникающие критические ситуации в динамическом режиме.

Актуальность исследования обусловлена тем, что применяемая на технологических производствах АСУ ТП не учитывает всех существующих показателей пожарной опасности обрабатываемых в технологических аппаратах веществ, в данном случае водородсодержащего газа, что не позволяет полноценно оценивать риски возникновения аварийных ситуаций.

Внедрение расчетной оценки уровня безопасности технологического оборудования, использующего водород, позволит обеспечить существенное снижение аварийности и прочих производственных рисков. Работа направлена на решение данной проблемы.

В странах с развитой водородной инфраструктурой данная проблема частично решена. Так, в работе [3] представлен обзор критериев опасности, которые могут быть использованы при количественной оценке пожарного уровня пожарной опасности водородных установок.

В исследовании [4] предлагается модель оценки рисков на основе индекса, оценивающая водородную инфраструктуру, используя относительный рейтинг рисков, таких как: производство, хранение и транспортировка водорода.

Разработан программный инструментальный HyRAM для оценки безопасности инфраструктуры заправки топливом и хранения водорода. Его также используют для количественной оценки пожарного риска с интегрированным анализом последствий аварии [5].

Целью работы является разработка и развитие комплексного подхода в обеспечении пожарной безопасности для объектов водородной энергетики, позволяющей оценивать состояние взрывопожароопасного технологического оборудования в целом, в том числе в динамике.

Поставленные задачи представлены в виде разработки критериальной модели, а также программы для ЭВМ, содержащих в своем составе: описание и построение параметров критериальной модели, а также разработку методики отнесения технологического участка, на которой размещено водородное оборудование, к определенной категории уровня пожарной опасности (риска).

### Методы исследования

На сегодняшний день существует множество теоретических и экспериментальных методов определения показателей пожарной опасности газообразных веществ [6], однако некоторые из них невозможно применить для оценки пожарной опасности водородсодержащего газа из-за существенных отличий физико-химических и пожаровзрывоопасных свойств с углеводородными газами.

С точки зрения достижения целей: моделирования безопасности технологического процесса обращения водорода и создания системы обеспечения его безопасности в заданном технологическом процессе следует выделить два вида параметров – управляемые (внутренние (А) и управляющие (внешние (В)). Первые влияют на безопасность технологического процесса, улучшая или ухудшая ее, вторые воздействуют на состояние защищенности, в котором управляемые параметры находятся в зоне запрещенных значений. Таким образом, управляемые параметры зависят от управляющих. Следовательно, внутренние параметры в технологическом процессе можно рассматривать как набор показателей пожарной опасности. В соответствии с табл. 1 приложения к Федеральному закону от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» к перечню показателей, необходимых для оценки пожарной опасности газообразных веществ, относятся 19 показателей [7].

Любое состояние защищенности технологического процесса можно охарактеризовать следующим конечным множеством параметров:  $X = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_i)$ .

При  $x_i \geq x_{ik}^{don}$  действующее значение параметра источника опасности превышает допустимое значение, что означает опасное воздействие этого источника опасности на защищаемый объект [8].

Естественно, что необходимым условием обеспечения пожарной безопасности объекта является выполнение следующего неравенства:

$$Q^{\delta} = x_i \leq x_i^{\delta on},$$

где  $x_i$  – действующее значение параметра источника опасности;  $x_i^{\delta on}$  – допустимое значение параметра источника опасности.

Следовательно, необходимым условием при оценке уровня безопасности технологического оборудования, в котором обращается ВСГ, будет выглядеть следующим образом:

$$Q_i^{\delta} = \begin{cases} x_1 \leq x_1^{\delta on}; \\ x_2 \leq x_2^{\delta on}; \\ x_i \leq x_i^{\delta on}. \end{cases}$$

Состояние защищенности технологического процесса обращения ВСГ можно охарактеризовать следующим конечным множеством параметров:

$$X = \left\{ \begin{array}{l} A = \left( \delta_{\text{бэмз}}, \varphi_{\text{ПДГ}}, \Delta P, \varphi_{\text{ф}}, Q_{\text{н}}, S_{\text{н}}, u_0, \frac{dp}{dt}, q, t_{\text{сам}}, \varphi_{\text{н(в)}}, W_{\text{min}}, \varphi_{\text{O}_2}, \dots, x_{\text{n}} \right); \\ B = \left( T_{\text{апп}}, P_{\text{апп}}, V_{\text{апп}}, A, \tau_{\text{пост}}, T_0, \rho_{\text{в}}, P_0, d_{\text{кр}}, \dots, x_{\text{m}} \right) \end{array} \right\},$$

где  $W_{\text{min}}$  – минимальная энергия зажигания, Дж;  $\varphi_{\text{в}}$  – верхний концентрационный предел распространения пламени по смеси горючего вещества с воздухом, % (об.);  $\varphi_{\text{н}}$  – нижний концентрационный предел распространения пламени по смеси газообразного горючего вещества с воздухом, % (об.);  $\varphi_{\text{ф}}$  – минимальная флегматизирующая концентрация флегматизатора, % (об.);  $\Delta P$  – максимальное избыточное давление взрыва газа, кПа;  $dp/dt_{\text{max}}$  – максимальная скорость нарастания давления взрыва водородо-воздушной смеси, кПа/с;  $S_{\text{н}}$  – нормальная скорость распространения пламени, м/с;  $\varphi_{\text{O}_2}$  (МВСК) – минимальное взрывоопасное содержание кислорода в горючей смеси, % (об.);  $\varphi_{\text{ПДГ}}$  – концентрационный предел диффузионного горения газовых смесей в воздухе, % (об.);  $t_{\text{сам}}$  – температура самовоспламенения, К;  $d_{\text{кр}}$  – критический диаметр длинного цилиндрического огнегасящего канала, мм;  $\delta_{\text{бэмз}}$  (БЭМЗ) – максимальный экспериментальный безопасный зазор, мм;  $u_0$  – предельная скорость срыва диффузионного горения, м/с;  $Q$  – низшая теплота сгорания вещества, МДж/кг;  $q$  – удельная теплота сгорания вещества, МДж/кг;  $T_{\text{апп}}$  – температура технологического аппарата, К;  $T_0$  – температура вещества при нормальных условиях, 273 К;  $P_{\text{апп}}$  – давление в аппарате, кПа;  $V_{\text{апп}}$  – объем реакционного сосуда, м<sup>3</sup>;  $P_0$  – атмосферное давление, 101,3 кПа;  $\rho_{\text{в}}$  – плотность воздуха до взрыва при начальной температуре  $T_0$ , кг·м<sup>-3</sup>;  $A$  – кратность воздухообмена, создаваемого аварийной вентиляцией, с<sup>-1</sup>;  $\tau_{\text{пост}}$  – продолжительность поступления ВСГ в объем помещения, с (120 с, если вероятность отказа системы автоматики превышает 0,000001 в год и не обеспечено резервирование ее элементов; 300 с при ручном отключении трубопроводов).

### Результаты исследования и их обсуждение

В табл. 1 представлены основные параметры, влияющие на безопасность технологического оборудования, в котором обращается ВСГ, их допустимые значения, методы расчета, а также исходные данные, задаваемые оператором АСУ ТП для оценки уровня пожарной опасности.

Таблица 1

**Допустимые значения основных параметров, влияющих на безопасность технологического оборудования, в котором обращается ВСГ**

Параметр	Параметры, задаваемые оператором	Допустимое (предельное) значение	Единицы измерения	Расчетная формула
$\varphi_n$	$T_{анп}$ (задается, в К), $\varphi_{н0}$ (4,0 % (об.), $T_r$ (2318 К)	4,0 [9]	% (об.)	$\varphi_n = \varphi_{н0} \left(1 - \frac{T_{анп} - T_0}{T_c - T_0}\right)$ [14]
$\varphi_v$	$T_{анп}$ (задается, в К), $\varphi_{v0}$ (75,0 % (об.), $T_r$ (2318 К)	75,0 [9]	% (об.)	$\varphi_v = \varphi_{v0} \left(1 + \frac{T_{анп} - T_0}{T_c - T_0}\right)$ [14]
$\delta_{бэмз}$	$d_{кр}$ (м)	0,00029 [10]	м	$\delta_{бэмз} = \frac{d_{кр}}{3}$ [17]
$\Delta P$	$b$ (м), $l$ (м), $h$ (м), $Q_n$ (кДж/кг), $C_p$ (кДж/(кг·К)), $\rho_v$ (кг/м <sup>3</sup> ), $Z$ (1), $T_v$ (К), $P_0$ (101,3 кПа), $P_{анп}$ (кПа), $P_{труб}$ (кПа), $V_{анп}$ (м <sup>3</sup> ), $\tau_{пост}$ (120 с – автоматическое отключение, 300 с – ручное отключение), $Q_{всг}$ (м <sup>3</sup> /с), $A$ (0,0125 с <sup>-1</sup> ), $r_{подв}$ (м), $L_{подв}$ (м), $r_{отвод}$ (м), $L_{отвод}$ (м)	16 [11]	кПа	$\Delta P = \frac{m \cdot H_m \cdot Z \cdot P_0}{V_{св} \cdot \rho_v \cdot C_p \cdot T_0} \cdot \frac{1}{K_n}$ [19]
$\varphi_\phi$ : 1) состав (85 % (масс.) CO <sub>2</sub> и 15 % (масс.) хладон 114В2) 2) CO <sub>2</sub> 3) N <sub>2</sub>	Выбирается один из флегматизаторов, использующихся в АУПТ	38,4 74,4 91,2 [12]	% (об.)	$\varphi_\phi = \left(\sum_{i=1}^n \frac{\chi_i}{\varphi_i}\right)$ [15]
$S_u$	$P_{анп}$ (кПа), $T_{анп}$ (К), $S_{u0}$ (3,06 м/с), $m$ (2,23), $n$ (-0,12), $P_0$ (101,3 кПа), $T_0$ (273 К)	2,1 [13]	м/с	$S_u = S_{u0} \left(\frac{P_{анп}}{P_0}\right)^n \left(\frac{T_{анп}}{T_0}\right)^m$ [16]
$dp/dt$	$V_{анп}$ (м <sup>3</sup> ), $S_u$ (м/с), $P_{анп}$ (кПа)	$\frac{dP}{dt}_{max(дон)}$ = 81,55 $\cdot \frac{P_{анп(дон)} \cdot S_{u(дон)}}{V_{анп}^{\frac{1}{3}}}$	кПа/с	$\frac{dP}{dt}_{max} = 81,55 \cdot \frac{P_n \cdot S_u}{V^{\frac{1}{3}}}$ [17]
$t_{сам}$	$T_{анп}$ (К)	783 [12]	К	$Q_{сам}^{\delta} = T_{анп} \leq t_{сам}$
$W_{min}$	$a$ (0,5), $q_r$ (Дж/м <sup>3</sup> ), $l_k$ (м)	6800 [12]	Дж	$W_{min} = a q_c l_k^3$ [17]
$\varphi_{O_2}$ : 1) CO <sub>2</sub> 2) N <sub>2</sub>	$\varphi_\phi$ (соответствует концентрации выбранного флегматизатора, % (об.)	4,2 1,8 [12]	% (об.)	$\varphi_{O_2} = \frac{100 - \varphi_\phi}{4,844}$ [15]

Параметр	Параметры, задаваемые оператором	Допустимое (предельное) значение	Единицы измерения	Расчетная формула
$u_0$	$K (0,75);$ $\mu (2,016 \text{ кг/моль}); C_p$ $(20,80 \text{ кДж/(моль}\cdot\text{К)});$ $t_{\text{апп}} (\text{К}); P_0 (101,3 \text{ кПа});$ $P_{\text{апп}} (\text{кПа}), \gamma (1,410)$	600 [13]	м/с	$u_0 = K \sqrt{\frac{2C_p T_{\text{апп}}}{M} \cdot \left(1 - \frac{P_0}{P_0 + P_{\text{апп}}}\right)^{1-\frac{1}{\gamma}}} [18]$

*Примечание:*  $T_{\Gamma}$  – температура горения смеси в воздухе, К;  $b, l, h$  – ширина, длина и высота помещения, м;  $C_p$  – теплоемкость воздуха,  $\text{кДж}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ ;  $P_{\text{труб}}$  – давление в трубопроводе, кПа;  $Z$  – коэффициент участия ВСГ в горении;  $q_{\text{всг}}$  – расход ВСГ, определяемый в соответствии с технологическим регламентом в зависимости от давления в трубопроводе, его диаметра, температуры газовой среды и т.д.,  $\text{м}^3\cdot\text{с}^{-1}$ ;  $r_{\text{подв(отвод)}}$  – внутренний радиус трубопроводов, м;  $L_{\text{подв(отвод)}}$  – длина трубопроводов от аварийного аппарата до задвижек, м;  $S_{u0}$  – известное значение нормальной скорости при давлении  $P_0$  и температуре  $T_0$ , равное 3,06 м/с;  $n$  и  $m$  – соответственно барический и температурный показатели;  $q_{\Gamma}$  – удельное объемное количество тепла, необходимое для нагрева горючей смеси от  $t_0$  до  $t_{\text{сам}}$ ,  $\text{Дж/м}^3$ ;  $a$  – коэффициент пропорциональности;  $l_k$  – критический зазор зажигания, мм;  $K$  – коэффициент расхода форсунки, равный 0,75;  $C_p$  – теплоемкость исследуемой газовой смеси,  $20,80 \text{ кДж/(моль}\cdot\text{К)}$ ;  $\gamma$  – показатель адиабаты (коэффициент Пауссона, равный 1,410)

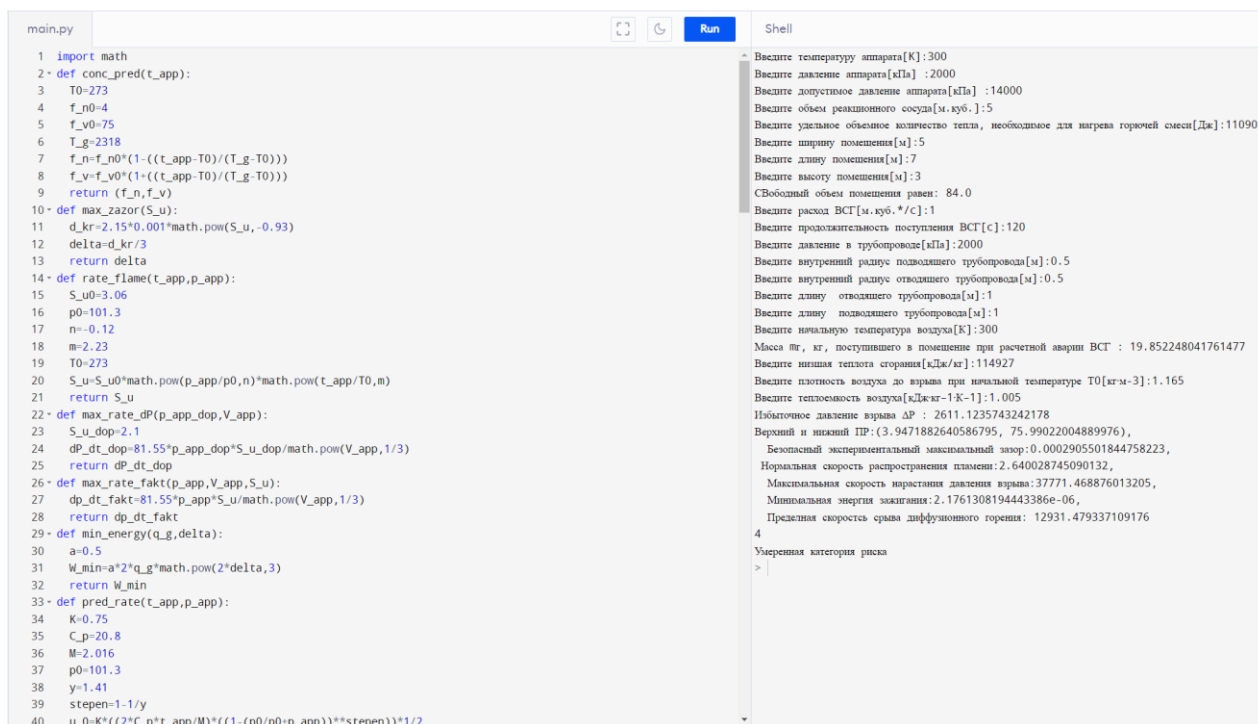
На базе высокоуровневого языка программирования Python был разработан программный код, позволяющий упростить определение параметров критериальной модели. В диалоговом окне вводятся исходные значения параметров, которые подставляются в расчетные формулы и сравниваются с допустимыми значениями параметров пожарной опасности. При превышении того или иного допустимого значения переменной присваивается 1, если допустимое значение не превышено переменной – присваивается 0. По результатам сравнения критериев отнесения технологического участка, на котором размещено водородное оборудование, к определенной категории уровня пожарной опасности (риска), технологическому участку присваивается категория уровня пожарной опасности (табл. 2).

Таблица 2

### Критерии отнесения технологического участка, на котором размещено водородное оборудование, к определенной категории уровня пожарной опасности

Категория уровня пожарной опасности	Критерии
Высокий	Превышаются более семи допустимых значений основных параметров
Средний	Превышаются не более семи допустимых значений основных параметров
Умеренный	Превышаются не более пяти допустимых значений основных параметров
Низкий	Превышаются не более трех допустимых значений основных параметров

Фрагмент критериальной модели оценки уровня безопасности технологического оборудования, где применяется водород, в виде исходного кода разработанной программы для электронной вычислительной машины (ЭВМ) на базе языка программирования Python представлен на рис. 2.



```

main.py
1 import math
2 - def conc_pred(t_app):
3   T0=273
4   f_n0=4
5   f_v0=75
6   T_g=2318
7   f_n=f_n0*(1-((t_app-T0)/(T_g-T0)))
8   f_v=f_v0*(1-((t_app-T0)/(T_g-T0)))
9   return (f_n,f_v)
10 - def max_zazor(S_u):
11   d_kr=2.15*0.001*math.pow(S_u,-0.93)
12   delta=d_kr/3
13   return delta
14 - def rate_fIame(t_app,p_app):
15   S_u0=3.06
16   p0=101.3
17   n=-0.12
18   m=2.23
19   T0=273
20   S_u=S_u0*math.pow(p_app/p0,n)*math.pow(t_app/T0,m)
21   return S_u
22 - def max_rate_dP(p_app,dop,V_app):
23   S_u_dop=2.1
24   dP_dt_dop=81.55*p_app*dop*S_u_dop/math.pow(V_app,1/3)
25   return dP_dt_dop
26 - def max_rate_fakt(p_app,V_app,S_u):
27   dP_dt_fakt=81.55*p_app*S_u/math.pow(V_app,1/3)
28   return dP_dt_fakt
29 - def min_energy(q_g,delta):
30   a=0.5
31   W_min=a*2*q_g*math.pow(2*delta,3)
32   return W_min
33 - def pred_rate(t_app,p_app):
34   K=0.75
35   C_p=20.8
36   M=2.016
37   p0=101.3
38   y=1.41
39   stepen=1-1/y
40   u=K*((2*C p t app/M)*((1-(p0/p0 p app))**stepen))**1/2
  
```

```

Shell
Введите температуру аппарата[K]:300
Введите давление аппарата[kPa] :2000
Введите допустимое давление аппарата[kPa] :14000
Введите объем реакционного сосуда[м.куб.]:5
Введите удельное объемное количество тепла, необходимое для нагрева горячей смеси[Дж]:11090
Введите ширину помещения[м]:5
Введите длину помещения[м]:7
Введите высоту помещения[м]:3
Свободный объем помещения равен: 84.0
Введите расход ВСГ[м.куб.*г/с]:1
Введите продолжительность поступления ВСГ[с]:120
Введите давление в трубопроводе[kPa]:2000
Введите внутренний радиус подводщего трубопровода[м]:0.5
Введите внутренний радиус отводящего трубопровода[м]:0.5
Введите длину отводящего трубопровода[м]:1
Введите длину подводщего трубопровода[м]:1
Введите начальную температура воздуха[K]:300
Масса mт, кг, поступившего в помещение при расчетной аварии ВСГ : 19.852248041761477
Введите низшая теплота сгорания[kJ/kg]:114927
Введите плотность воздуха до взрыва при начальной температуре T0[kг-м-3]:1.165
Введите теплоемкость воздуха[kJ/kg-K]:1.005
Избыточное давление взрыва ΔP : 2611.1235743242178
Верхний и нижний ПР:(3.9471882640586795, 75.99022004889976),
Безопасный экспериментальный максимальный зазор:0.0002905501844758223,
Нормальная скорость распространения пламени:2.640028745090132,
Максимальная скорость нарастания давления взрыва:37771.468876013205,
Минимальная энергия зажигания:2.1761308194443386e-06,
Предельная скорость срыва диффузного горения: 12931.479337109176
4
Умеренная категория риска
>
  
```

Рис. 2. Фрагмент критериальной модели в виде программы для ЭВМ на базе Python

## Заключение

Результаты исследования реализованы в виде программы для ЭВМ, которая прошла государственную регистрацию в Федеральной службе по интеллектуальной собственности [20]. В рамках проведенного исследования была достигнута цель работы путем решения следующих задач: представлены существующие модели оценки уровня пожарной опасности (риска) на объектах водородной энергетики; отмечена актуальность использования данных моделей в системах безопасности объектов водородной энергетики; разработана критериальная модель оценки уровня пожарной безопасности при эксплуатации технологического оборудования на объектах водородной энергетики, позволяющая оценивать состояние взрывопожароопасного технологического оборудования в целом, в том числе в динамике. К отличиям разработанной модели от других можно отнести простоту использования, а также оценку уровня пожарной опасности объекта с помощью метода расчета показателей, необходимых для определения пожарной опасности газообразных веществ, установленных Федеральным законом от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ, и в дальнейшем – отнесения объекта к определенной категории уровня пожарной опасности. Рассматриваемая модель апробирована и внедрена на нескольких объектах водородной энергетики, в их числе: электролизный цех Каргалинской ТЭЦ и электролизный цех Балаковской ТЭЦ. По результатам апробации данным цехам присвоена средняя категория уровня пожарной опасности. В будущем планируется апробировать и внедрить данную модель на технологических участках предприятий топливно-энергетического комплекса Санкт-Петербурга в составе систем безопасности АСУ ТП, использующих водородные системы охлаждения турбогенераторов. Также актуальным применением критериальной модели будет являться ее внедрение в систему безопасности АСУ ТП установок паровой конверсии природного газа нефтеперерабатывающих, нефтехимических, химических и металлургических предприятий.

## Список источников

1. Егоров А. Перепись водорода // Корпоративный журнал ПАО «Газпром». 2019. № 9. С. 42.

2. Global low carbon hydrogen production capacity to reach 14 mtpa in 2030, forecasts GlobalData. URL: <https://www.globaldata.com/media/oil-gas/global-low-carbon-hydrogen-production-capacity-reach-14-mtpa-2030-forecasts-globaldata/> (дата обращения: 16.05.2023).
3. LaChance J., Tchouvelev A., Engebo A. Development of uniform harm criteria for use in quantitative risk analysis of the hydrogen infrastructure // International journal of hydrogen energy. 2011. Т. 36. № 3. С. 2381–2388.
4. Kim J., Lee Y., Moon I. An index-based risk assessment model for hydrogen infrastructure // International journal of hydrogen energy. 2011. Т. 36. № 11. С. 6387–6398.
5. Groth K.M., Hecht E.S. HyRAM: A methodology and toolkit for quantitative risk assessment of hydrogen systems // International journal of hydrogen energy. 2017. Т. 42. № 11. С. 7485–7493.
6. Шебеко А.Ю. Особенности пожарной опасности горючих газовых смесей сложного состава. М.: ООО «Изд-во ТРИУМФ», 2018. 146 с. DOI: 10.32986/978-5-93673-204-1-2018-1-150.
7. Тимошенко А.Л., Самигуллин Г.Х., Алексеик Е.Б. Показатели, необходимые для оценки пожарной опасности водородсодержащего газа // Пожарная безопасность: современные вызовы. Проблемы и пути решения: материалы Всерос. науч.-практ. конф. СПб.: С.-Петербург. ун-т ГПС МЧС России, 2023.
8. Безопасность жизнедеятельности: учеб. для студ. учреждений высш. проф. образования / В.А. Трефилов [и др.]; под ред. В.А. Трефилова. М.: Издательский центр «Академия», 2011. 304 с.
9. Гамбург Д.Ю., Семенов В.П., Дубовкин Н.Ф. Водород. Свойства, получение, хранение, транспортирование, применение. М.: Химия, 1989. 672 с.
10. ГОСТ 12.1.011–78. Система стандартов безопасности труда. Смеси взрывоопасные. Классификация и методы испытаний. URL: <https://docs.cntd.ru/document/871001049> (дата обращения: 16.05.2023).
11. Об утверждении Руководства по безопасности «Методические основы анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах»: приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 3 нояб. 2022 г. № 387. М., 2022. 85 с.
12. Корольченко А.Я., Корольченко Д.А. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения: справ.: в 2-х т. Сер.: Учебные и справочные издания. М.: ООО «Издательство «Пожнаука», 2004. Т. 2. 774 с.
13. Гельфанд Б.Е., Попов О.Е., Чайванов Б.Б. Водород. Параметры горения и взрыва. М.: Физматлит, 2008. 288 с.
14. Теория горения и взрыва: практикум / Н.Н. Вершинин [и др.]. Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2014. 64 с.
15. Минимальные флегматизирующие концентрации экологически безопасных огнетушащих составов для горючих газовоздушных смесей / А.П. Чугуев [и др.] // Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. 2019. № 1 (10). С. 450–453.
16. ГОСТ Р 12.3.047–98. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200003311> (дата обращения: 16.05.2023).
17. Расчет основных показателей пожаровзрывоопасности веществ материалов: руководство (согласовано ГУГПС МЧС России, исх. № 30/4/1808 от 25 июня 2002 г., утв. ФГУ ВНИИПО МЧС России от 30 авг. 2002 г.). М.: ВНИИПО МЧС России, 2002. 77 с.
18. ГОСТ 12.1.044–2018. Система стандартов безопасности труда. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200160696> (дата обращения: 16.05.2023).



19. СП 12.13130.2009. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200071156> (дата обращения: 16.05.2023).

20. Расчет пожарного риска технологического участка объекта водородной энергетики: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2023663736 Рос. Федерация / А.Л. Тимошенко, Г.Х. Самигуллин, Д.В. Медведев; заявитель и правообладатель Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России. № 2023661668; заявл. 06.06.2023; опублик. 27.06.2023, Бюл. № 7. 1 с.

## References

1. Egorov A. Perepis' vodoroda // Korporativnyj zhurnal PAO «Gazprom». 2019. № 9. S. 42.
2. Global low carbon hydrogen production capacity to reach 14 mtpa in 2030, forecasts GlobalData. URL: <https://www.globaldata.com/media/oil-gas/global-low-carbon-hydrogen-production-capacity-reach-14-mtpa-2030-forecasts-globaldata/> (дата обращения: 16.05.2023).
3. LaChance J., Tchouvelev A., Engebo A. Development of uniform harm criteria for use in quantitative risk analysis of the hydrogen infrastructure // International journal of hydrogen energy. 2011. Т. 36. № 3. S. 2381–2388.
4. Kim J., Lee Y., Moon I. An index-based risk assessment model for hydrogen infrastructure // International journal of hydrogen energy. 2011. Т. 36. № 11. S. 6387–6398.
5. Groth K.M., Hecht E.S. HyRAM: A methodology and toolkit for quantitative risk assessment of hydrogen systems // International journal of hydrogen energy. 2017. Т. 42. № 11. P. 7485–7493.
6. Shebeko A.Yu. Osobennosti pozharnoj opasnosti goryuchih gazovyh smesej slozhnogo sostava. M.: ООО «Izd-vo TRIUMF», 2018. 146 s. DOI: 10.32986/978-5-93673-204-1-2018-1-150.
7. Timoshenko A.L., Samigullin G.H., Alekseik E.B. Pokazateli, neobhodimye dlya ocenki pozharnoj opasnosti vodorodsoderzhashchego gaza // Pozharnaya bezopasnost': sovremennye vyzovy. Problemy i puti resheniya: materialy Vseross. nauch.-prakt. konf. SPb.: S.-Peterb. un-t GPS MCHS Rossii, 2023.
8. Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti: ucheb. dlya stud. uchrezhdenij vyssh. prof. obrazovaniya / V.A. Trefilov [i dr.]; pod red. V.A. Trefilova. M.: Izdatel'skij centr «Akademiya», 2011. 304 s.
9. Gamburg D.Yu., Semenov V.P., Dubovkin N.F. Vodorod. Svoystva, poluchenie, hranenie, transportirovanie, primenenie. M.: Himiya, 1989. 672 s.
10. GOST 12.1.011–78. Sistema standartov bezopasnosti truda. Smesi vzryvoopasnye. Klassifikaciya i metody ispytaniy. URL: <https://docs.cntd.ru/document/871001049> (дата обращения: 16.05.2023).
11. Ob utverzhdenii Rukovodstva po bezopasnosti «Metodicheskie osnovy analiza opasnostej i ocenki riska avarij na opasnyh proizvodstvennyh ob'ektah»: prikaz Federal'noj sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru ot 3 noyab. 2022 g. № 387. M., 2022. 85 s.
12. Korol'chenko A.Ya., Korol'chenko D.A. Pozharovzryvoopasnost' veshchestv i materialov i sredstva ih tusheniya: sprav.: v 2-h t. Ser.: Uchebnye i spravochnye izdaniya. M.: ООО «Izdatel'stvo «Pozhnauka», 2004. Т. 2. 774 s.
13. Gel'fand B.E., Popov O.E., Chajvanov B.B. Vodorod. Parametry goreniya i vzryva. M.: Fizmatlit, 2008. 288 s.
14. Teoriya goreniya i vzryva: praktikum / N.N. Vershinin [i dr.]. Penza: Izd-vo Penz. gos. un-ta, 2014. 64 s.
15. Minimal'nye flegmatiziruyushchie koncentracii ekologicheski bezopasnyh ogetushashchih sostavov dlya goryuchih gazovozdushnyh smesey / A.P. Chuguev [i dr.] // Sovremennye tekhnologii obespecheniya grazhdanskoj oborony i likvidacii posledstvij chrezvychajnyh situacij. 2019. № 1 (10). S. 450–453.

16. GOST R 12.3.047–98. Sistema standartov bezopasnosti truda. Pozharnaya bezopasnost' tekhnologicheskikh processov. Obshchie trebovaniya. Metody kontrolya. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200003311> (data obrashcheniya: 16.05.2023).

17. Raschet osnovnykh pokazatelej pozharovzryvoopasnosti veshchestv materialov: rukovodstvo (soglasovano GUGPS MCHS Rossii, iskh. № 30/4/1808 ot 25 iyunya 2002 g., utv. FGU VNIPO MCHS Rossii ot 30 avg. 2002 g.). M.: VNIPO MCHS Rossii, 2002. 77 s.

18. GOST 12.1.044–2018. Sistema standartov bezopasnosti truda. Pozharovzryvoopasnost' veshchestv i materialov. Nomenklatura pokazatelej i metody ih opredeleniya. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200160696> (data obrashcheniya: 16.05.2023).

19. SP 12.13130.2009. Opredelenie kategorij pomeshchenij, zdaniy i naruzhnykh ustanovok po vzryvopozharnoj i pozharnoj opasnosti. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200071156> (data obrashcheniya: 16.05.2023).

20. Raschet pozharnogo riska tekhnologicheskogo uchastka ob"ekta vodorodnoj energetiki: svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EVM 2023663736 Ros. Federaciya / A.L. Timoshenko, G.H. Samigullin, D.V. Medvedev; zayavitel' i pravoobladatel' Sankt-Peterburgskij universitet GPS MCHS Rossii. № 2023661668; zayavl. 06.06.2023; opubl. 27.06.2023, Byul. № 7. 1 s.

#### **Информация о статье:**

Статья поступила в редакцию: 31.05.2023; одобрена после рецензирования: 17.07.2023; принята к публикации: 28.08.2023

#### **The information about article:**

The article was submitted to the editorial office: 31.05.2023; approved after review: 17.07.2023; accepted for publication: 28.08.2023

#### *Информация об авторах:*

**Тимошенко Артем Леонидович**, адъюнкт факультета подготовки кадров высшей квалификации Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), e-mail: [artem18181@gmail.com](mailto:artem18181@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-3927-5613>, SPIN-код: 6923-0111

**Самигуллин Гафур Халафович**, профессор кафедры пожарной безопасности технологических процессов и производств Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), доктор технических наук, доцент, e-mail: [samigullin.g@igps.ru](mailto:samigullin.g@igps.ru), <https://orcid.org/0000-0002-5688-8921>, SPIN-код: 8830-4253

#### *Information about the authors:*

**Timoshenko Artem L.**, postgraduate student of the faculty of training of highly qualified personnel of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), e-mail: [artem18181@gmail.com](mailto:artem18181@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-3927-5613>, SPIN: 6923-0111

**Samigullin Gafur Kh.**, professor of the department of fire safety of technological processes and productions of the Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), doctor of technical sciences, associate professor, e-mail: [spi78@mail.ru](mailto:spi78@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-4651-8513>, SPIN: 8830-4253