

**С. В. ПУЗАЧ**, д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, начальник кафедры инженерной теплофизики и гидравлики, Академия ГПС МЧС России (Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; e-mail: puzachsv@mail.ru)

**ТУАН АНЬ ЛЕ**, адъюнкт, Академия ГПС МЧС России (Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина; e-mail: leanhtuant34@gmail.com)

УДК 614.841

## ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ ГОРЕНИЯ ДРЕВЕСНОЙ МАССЫ ДЕРЕВЬЕВ ДЛЯ РАСЧЕТА ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЕРХОВЫХ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ НА ОБЪЕКТЫ ЭНЕРГЕТИКИ ВЬЕТНАМА

Обоснован выбор значений удельного коэффициента образования монооксида углерода и удельной массовой скорости газификации, необходимых для математического моделирования параметров и теплового воздействия верховых лесных пожаров на объекты энергетики Вьетнама. Представлены результаты экспериментального исследования процесса горения образцов древесной массы стволов наиболее распространенных лиственных и хвойных пород деревьев Вьетнама. Для режима пламенного горения получены экспериментальные зависимости удельного коэффициента выделения монооксида углерода и удельной массовой скорости газификации от времени испытаний образцов древесины. Проведено сопоставление средних значений этих параметров с данными, приведенными в литературных источниках. Показано, что средние по времени экспериментальные значения удельной массовой скорости газификации всех образцов древесины находятся в диапазоне между соответствующими значениями для хвойных и лиственных пород деревьев, приведенными в базе данных пожарной нагрузки Ю. А. Кошмарова.

**Ключевые слова:** лесной пожар; моделирование; удельная массовая скорость газификации; удельный коэффициент выделения CO; монооксид углерода.

**DOI:** 10.18322/PVB.2018.27.11.5-14

### Введение

Лесные пожары могут приводить к катастрофическим разрушениям жизненно важных для экономики и безопасности страны объектов энергетики, прекращение функционирования которых ведет к нарушению жизнедеятельности человека.

Математическое моделирование лесных пожаров является очень сложной, до конца не решенной, многофакторной и нелинейной задачей [1–16]. Неопределенность теплофизических и химических свойств лесных горючих материалов не позволяет проводить достоверный расчет теплового потока от лесного пожара, воздействующего на энергетические объекты Вьетнама, такие как электроподстанции, ТЭС, ГЭС, линии электропередач и т. д. В связи с этим исследование процесса горения древесной массы деревьев Вьетнама представляет собой актуальную научную и практическую задачу.

Целью статьи является обоснование исходных данных для математического моделирования параметров и теплового воздействия верховых лесных пожаров на объекты энергетики Вьетнама.

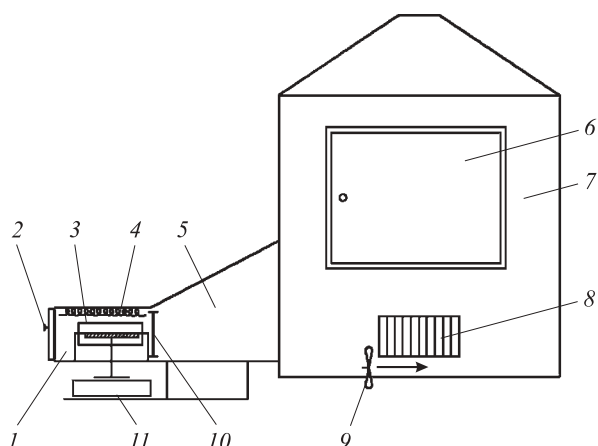
Для ее достижения были проведены экспериментальные исследования процесса горения образцов древесной массы наиболее распространенных лиственных и хвойных пород деревьев Вьетнама.

### Экспериментальная установка и методика проведения экспериментов

На рис. 1 приведена схема экспериментальной установки, предложенной в работах [17–19].

Установка состоит из камеры сгорания 1, которая соединена с экспозиционной камерой 7 с помощью переходного рукава 5.

Внутренний объем камеры сгорания равен  $3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ . Ее стенки изготовлены из листовой нержавеющей стали толщиной  $(2,0 \pm 0,1) \text{ мм}$ . Наблюдения за образцами материалов во время испытаний проводятся через окно, изготовленное из кварцевого стекла. Изменение режима испытаний с помощью воздухообмена камеры с помещением осуществляется через находящиеся на боковой стенке камеры шиберные отверстия.



**Рис. 1.** Принципиальная схема опытной установки: 1 — камера сгорания; 2 — дверца камеры сгорания; 3 — держатель образца; 4 — электронагревательный излучатель; 5 — переходной рукав; 6 — дверца экспозиционной камеры; 7 — экспозиционная камера; 8 — шиберные отверстия; 9 — вентилятор; 10 — заслонка (перегородка) переходного рукава; 11 — столик с весами

Устройство теплового блокирования экспозиционной камеры от камеры сгорания размещено в переходном рукаве.

В экспозиционной камере с кубическим объемом 0,5887 м<sup>3</sup> и с верхней частью в виде конуса на боковой стенке находятся шиберные отверстия 8.

Экранированный электронагревательный излучатель 4 и держатель образца 3 размещены в камере сгорания.

Электронные весы 11, на которых расположен держатель образца, позволяют измерять массу образца с погрешностью, не превышающей ±1 мг. Весы установлены на столике, положение которого регулируется по высоте.

Измерения температуры в экспозиционной камере проводятся непрерывно с использованием 32 низкоинерционных бронированных термопар. Диапазон измеряемых температур составляет от минус 40 до +1100 °С. Погрешность измерений не превышает ±1,5t (°С).

Плотность теплового потока, поступающего от экранированного электронагревательного излучателя на поверхность образца материала, измеряется водоохлаждаемым датчиком типа Гордона с погрешностью, не превышающей ±8 %.

Состав газовой среды в экспозиционной камере определяется с помощью многоканального газоанализатора с диапазонами измерений концентраций газов (с максимальной погрешностью ±10 % об.): монооксида углерода СО — 0–1 % об., диоксида углерода СО<sub>2</sub> — 0–5 % об., кислорода О<sub>2</sub> — 0–21 % об.

Испытания проводились в режиме пламенного горения, который обеспечивался плотностью пада-

ющего теплового потока 60 кВт/м<sup>2</sup>. Температура поверхности излучателя составляла 750 °С.

Эксперименты проводились по следующей методике.

Во вкладыш держателя образца помещали предварительно взвешенный образец материала, имеющий комнатную температуру.

После стабилизации режима работы электронагревательного излучателя открывали дверцу камеры сгорания и помещали в держатель образца вкладыш с образцом древесины. Затем открывали заслонку переходного рукава, а дверцу камеры сгорания закрывали. Происходило возгорание образца.

Во время эксперимента непрерывно измеряли концентрацию СО, СО<sub>2</sub>, О<sub>2</sub>, температуру и массу образца.

Далее определялась удельная массовая скорость газификации по следующей формуле:

$$\Psi_{уд} = \frac{1}{F} \frac{dM}{dt}, \quad (1)$$

где  $\Psi_{уд}$  — удельная массовая скорость газификации, кг/(м<sup>2</sup>·с);

$F$  — площадь поверхности образца, м<sup>2</sup>;

$M$  — текущая масса образца, кг;

$t$  — время испытания, с.

Для прогнозирования токсикологической обстановки на лесных пожарах необходимо, в первую очередь, знать концентрацию монооксида углерода, поэтому в экспериментах определялся удельный коэффициент образования СО  $L_{CO}$  в каждый момент времени по следующей формуле:

$$L_{CO} = \frac{V}{\Psi_{уд} F} \frac{d\rho_{CO}}{dt}, \quad (2)$$

где  $V$  — объем экспозиционной камеры, м<sup>3</sup>;

$\rho_{CO}$  — среднеобъемная плотность СО в экспозиционной камере, кг/м<sup>3</sup>.

### Исходные данные

Для математического моделирования параметров и теплового воздействия верховых лесных пожаров на объекты энергетики необходимо, в первую очередь, знать низшую рабочую теплоту сгорания  $Q_H^p$  (МДж/кг) и удельную массовую скорость газификации древесной биомассы.

Анализ данных, приведенных в работах [20, 21], показывает, что низшая рабочая теплота сгорания древесины хвойных и лиственных пород деревьев находится в диапазоне  $Q_H^p = 13,8 \div 21,2$  МДж/кг. Поэтому, если используется ее среднее значение, равное 17,5 МДж/кг, погрешность по сравнению с ее истинным значением не превышает 27 %.

Проведем измерения удельной массовой скорости газификации образцов пород древесной

**Таблица 1.** Рассматриваемые породы деревьев Вьетнама

| Номер образца | Название (русское, вьетнамское) | Класс дерева | Влажность, % |
|---------------|---------------------------------|--------------|--------------|
| 1             | Акация, keo                     | Лиственные   | < 5          |
| 2             | Мелия ацедарах, xoan            |              | < 5          |
| 3             | Сосна, họ thông                 | Хвойные      | < 5          |
| 4             | Эвкалипт, bạch đàn              | Лиственные   | 8            |
| 5             | Лонган, nhãn                    |              | 7            |

массы стволов деревьев Вьетнама, представленных в табл. 1. Размеры образцов древесины составляли  $0,1 \times 0,1 \times 0,02$  м.

Влажность образцов измерялась влагомером ZNT 125 Electronic с диапазоном измерений 5–50 % и погрешностью измерений  $\pm 2$  %. Влажность образцов не превышала 8 % (см. табл. 1), что соответствует влажности деревьев Вьетнама в наиболее пожароопасный засушливый период года.

### Результаты экспериментов и их анализ

На рис. 2 представлены экспериментальные зависимости удельной скорости газификации образцов древесины от времени испытаний.

Из рис. 2 видно, что локальные значения  $\psi_{уд}$  после 2 мин испытаний находятся в диапазоне от 0,0063 до 0,014  $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ , где нижний предел соответствует горению хвойных пород деревьев, а верхний — лиственных [21].

На рис. 3 приведены экспериментальные зависимости удельных массовых коэффициентов обра-

зования CO от времени. Анализ результатов экспериментов показывает, что величина удельного коэффициента образования CO пренебрежимо мала на начальной стадии испытаний. Это объясняется тем, что в этот период концентрация кислорода практически постоянна, равна концентрации в воздухе помещения и монооксид углерода окисляется до диоксида CO<sub>2</sub>. По мере уменьшения концентрации O<sub>2</sub> концентрация CO быстро увеличивается.

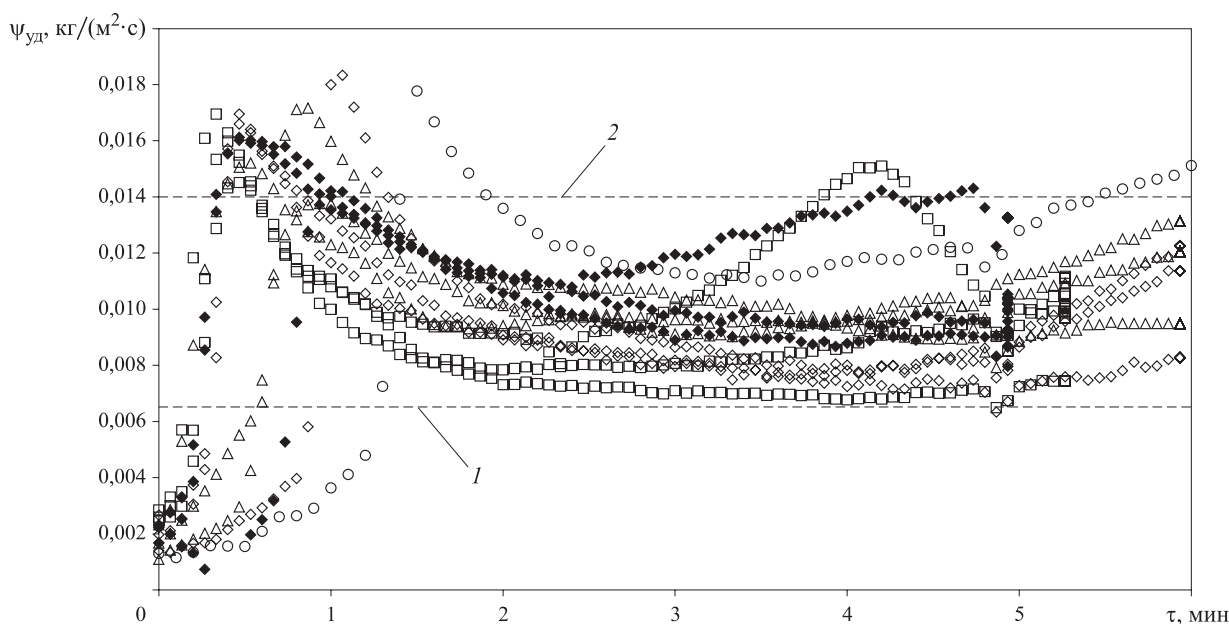
Средние за время проведения экспериментов значения  $\psi_{уд}$  и  $L_{CO}$  представлены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что:

- экспериментальные средние значения  $\psi_{уд}$  находятся в диапазоне от 0,0063  $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$  для хвойных пород до 0,014  $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$  — для лиственных [21];
- экспериментальные средние опытные значения  $L_{CO}$  существенно меньше (более чем в 2 раза) по сравнению с приведенными в базе данных [21].

Из рис. 2 видно, что зависимости удельной массовой скорости газификации древесины от времени имеют максимум в начале процесса газификации. Время выхода на максимальные значения не превышает 0,5–2 мин в зависимости от породы дерева, после чего происходит относительная стабилизация процесса газификации древесины.

Значения удельного массового коэффициента образования CO согласно рис. 3 примерно через 2 мин от начала горения пренебрежимо малы. Затем в течение 1–2 мин (в зависимости от породы дерева) происходит их резкий рост до максимальных значений. Это объясняется тем, что с течением времени происходит уменьшение концентрации кислорода



**Рис. 2.** Зависимость удельной массовой скорости газификации древесной массы от времени испытаний образцов: □ — № 1; △ — № 2; ◆ — № 3; ○ — № 4; ◇ — № 5; 1 — хвойные породы,  $\psi_{уд} = 0,0063 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ; 2 — лиственные породы,  $\psi_{уд} = 0,014 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$  [21]

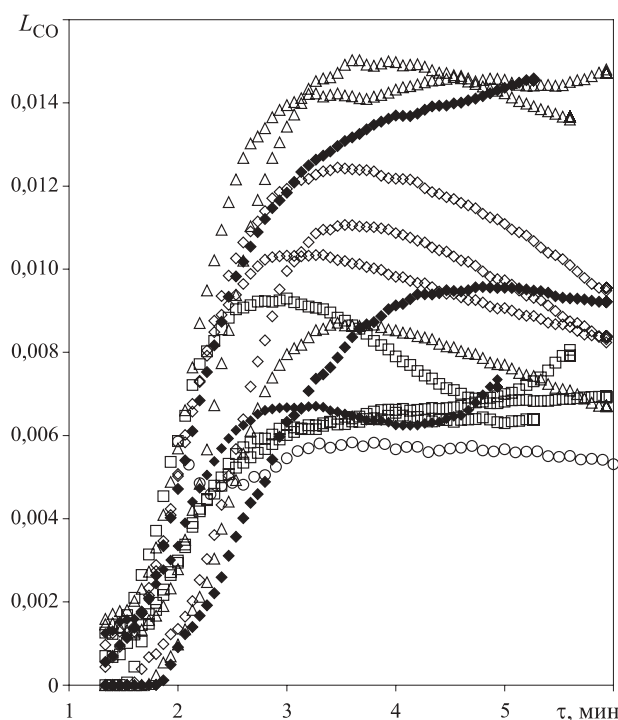


Рис. 3. Зависимость удельного массового коэффициента образования СО от времени испытаний образцов: □ — № 1; △ — № 2; ◆ — № 3; ○ — № 4; ◇ — № 5

в камере сгорания (см. рис. 1) и не весь моноксид углерода окисляется до диоксида.

Полученные средние экспериментальные значения удельной массовой скорости газификации и

Таблица 2. Средние за время проведения экспериментов значения  $\psi_{уд}$  и  $L_{CO}$

| Номер образца | $\psi_{уд}$ , кг/(м <sup>2</sup> ·с) |        | $L_{CO}$      |       |
|---------------|--------------------------------------|--------|---------------|-------|
|               | Данная работа                        | [21]   | Данная работа | [21]  |
| 1             | 0,0093                               | 0,014  | 0,0052        | 0,024 |
| 2             | 0,0102                               |        | 0,0107        |       |
| 3             | 0,0113                               | 0,0063 |               |       |
| 4             | 0,0127                               | 0,014  | 0,012         |       |
| 5             | 0,0091                               |        | 0,008         |       |

удельного массового коэффициента образования СО для образцов древесной массы наиболее распространенных лиственных и хвойных пород деревьев Вьетнама могут быть использованы при расчете характеристик верховых пожаров.

### Заключение

Экспериментальные исследования процесса горения образцов древесной массы наиболее распространенных лиственных и хвойных пород деревьев Вьетнама позволяют обосновать выбор значений удельного коэффициента образования СО и удельной массовой скорости газификации, необходимых для математического моделирования параметров и теплового воздействия верховых лесных пожаров на объекты энергетики Вьетнама.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пузач С. В., Горюшкин С. С. Оценка теплового воздействия лесного пожара на электрическую подстанцию с масляными трансформаторами // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. — 2017. — № 3. — С. 79–83. DOI: 10.25257/FE.2017.3.79-83.
2. Доррер Г. А. Динамика лесных пожаров. — Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2008. — 404 с.
3. Гришин А. М. О математическом моделировании природных пожаров и катастроф // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. — 2008. — № 2(3). — С. 105–114.
4. Alexander M. E., Cruz M. G., Vaillant N. M. Toward improving our application and understanding of crown fire behavior // Fire Management Today. — 2014. — Vol. 73, No. 4. — P. 46–47.
5. Morvan D. Physical phenomena and length scales governing the behaviour of wildfires: a case for physical modelling // Fire Technology. — 2011. — Vol. 47, Issue 2. — P. 437–460. DOI: 10.1007/s10694-010-0160-2.
6. Mandel J., Bennethum L. S., Beezley J. D., Coen J. L., Douglas C. C., Kim M., Vodacek A. A wildland fire model with data assimilation // Mathematics and Computers in Simulation. — 2008. — Vol. 79, Issue 3. — P. 584–606. DOI: 10.1016/j.matcom.2008.03.015.
7. Sullivan A. L. Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007. 3: Simulation and mathematical analogue models // International Journal of Wildland Fire. — 2009. — Vol. 18, No. 4. — P. 387–403. DOI: 10.1071/wf06144.
8. Rochoux M. C., Emery C., Ricci S., Cuenot B., Trouvé A. Towards predictive data-driven simulations of wildfire spread — Part II: Ensemble Kalman Filter for the state estimation of a front-tracking simulator of wildfire spread // Natural Hazards and Earth System Sciences. — 2015. — Vol. 15, No. 8. — P. 1721–1739. DOI: 10.5194/nhess-15-1721-2015.

9. Rochoux M. C., Ricci S., Lucor D., Cuenot B., Trouvé A. Towards predictive data-driven simulations of wildfire spread — Part I: Reduced-cost Ensemble Kalman Filter based on a Polynomial Chaos surrogate model for parameter estimation // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. — 2014. — Vol. 14, No. 11. — P. 2951–2973. DOI: 10.5194/nhess-14-2951-2014.
10. Tymstra C., Bryce R. W., Wotton B. M., Armitage O. B. Development and structure of Prometheus: the Canadian wildland fire growth simulation model / *Information Report NOR-X-417*. — Edmonton : Natural Resources of Canada, Canadian Forest Service, 2010.
11. Sardoy N., Consalvi J.-L., Porterie B., Fernandez-Pello A. C. Modeling transport and combustion of firebrands from burning trees // *Combustion and Flame*. — 2007. — Vol. 150, Issue 3. — P. 151–169. DOI: 10.1016/j.combustflame.2007.04.008.
12. Kaur I., Mentrelli A., Bosseur F., Filippi J.-B., Pagnini G. Turbulence and fire-spotting effects into wild-land fire simulators // *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulations*. — 2016. — Vol. 39. — P. 300–320. DOI: 10.1016/j.cnsns.2016.03.003.
13. Martin J., Hillen T. The spotting distribution of wildfires // *Applied Sciences*. — 2016. — Vol. 6, No. 6. — P. 177. DOI: 10.3390/app6060177.
14. Cunningham P., Goodrick S. L., Hussaini M. Y., Linn R. R. Coherent vortical structures in numerical simulations of buoyant plumes from wildland fires // *International Journal of Wildland Fire*. — 2005. — Vol. 14, Issue 1. — P. 61–75. DOI: 10.1071/wf04044.
15. Кузнецов С. Л., Пузач С. В., Ярошенко А. В. Математическая модель распространения кромки природного пожара с учетом основных особенностей растительности, ландшафта местности и состояния атмосферы // *Материалы 20-й научно-технической конференции “Системы безопасности–2011”*. — М. : Академия ГПС МЧС РФ, 2011. — С. 195–197.
16. Varner J. M., Keyes C. R. Fuels treatment and fire models: errors and corrections // *Fire Management Today*. — 2009. — Vol. 69, No. 3. — P. 47–50.
17. Пузач С. В., Сулейкин Е. В. Новый теоретико-экспериментальный подход к расчету распространения токсичных газов при пожаре в помещении // *Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety*. — 2016. — Т. 25, № 2. — С. 13–20. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.02.13-20.
18. Пузач С. В., Акперов Р. Г. Экспериментальное определение удельного коэффициента образования монооксида углерода при пожаре в помещении // *Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety*. — 2016. — Т. 25, № 5. — С. 18–25. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.05.18-25.
19. Пузач С. В., Сулейкин Е. В., Акперов Р. Г., Пузач В. Г. Об экспериментальной оценке токсичности продуктов горения при пожаре в помещении // *Технологии техносферной безопасности*. — 2013. — Вып. 4(50). — 11 с.
20. Иванов А. В. Лесная пирология : конспект лекций. — 2-е изд. — Йошкар-Ола : Поволжский гос. технологический ун-т, 2013. — 275 с.
21. Кошмаров Ю. А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении. — М. : Академия ГПС МВД России, 2000. — 118 с.

*Материал поступил в редакцию 9 октября 2018 г.*

**Для цитирования:** Пузач С. В., Ле Ань Туан. Обоснование выбора параметров горения древесной массы деревьев для расчета воздействия верховых лесных пожаров на объекты энергетики Вьетнама // *Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety*. — 2018. — Т. 27, № 11. — С. 5–14. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.11.5-14.



**S. V. PUZACH**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Honoured Scientist of the Russian Federation, Head of Thermal Physics and Hydraulic Department, State Fire Academy of Emercom of Russia (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; e-mail: puzachsv@mail.ru)

**TUAN ANH LE**, Postgraduate Student, Fire Safety in Building Department, State Fire Academy of Emercom of Russia (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; e-mail: leanhtuant34@gmail.com)

UDC 614.841

## JUSTIFICATION OF THE CHOICE OF WOOD PULP COMBUSTION PARAMETERS FOR CALCULATION OF RUNNING CROWNING FOREST FIRES IMPACT ON POWER ENGINEERING FACILITIES IN VIETNAM

The choice is justified for the values of specific carbon monoxide formation coefficient and the specific mass gasification rate required for mathematical modeling of the parameters and heat impact of running crowning forest fires on the power engineering facilities in Vietnam. The results of an experimental study of the combustion process of wood pulp samples of the trunks of the most common hardwood and coniferous trees of Vietnam are presented. For the flaming combustion, the experimental dependences of the specific carbon monoxide emission coefficient and the specific mass gasification rate on the time period of testing of wood samples were obtained. A comparison of the average values of these parameters with the data given in the literature was carried out. It is shown that the average experimental values of the specific mass gasification rate of all wood samples in terms of time are in the range between the corresponding values for coniferous and hardwood trees listed in the fire load database by Yu. A. Koshmarov.

**Keywords:** forest fire; modeling; specific mass gasification rate; specific carbon monoxide emission coefficient; carbon monoxide.

**DOI:** 10.18322/PVB.2018.27.11.5-14

### Introduction

Forest fires can cause catastrophic destruction of energy facilities vital for the economy and security of a country, the breakdown of which can cause the human livelihood disruption.

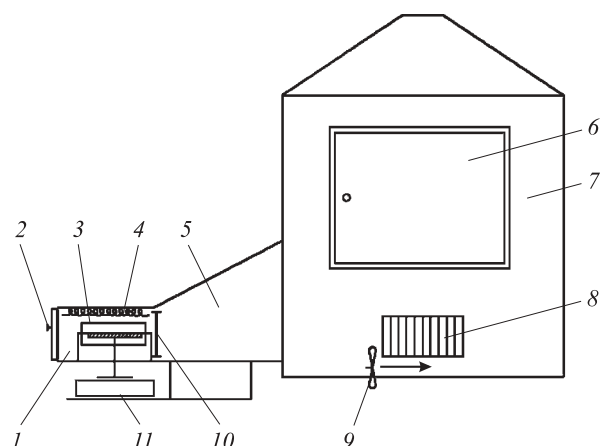
Mathematical modeling of forest fires is a very complex, not completely resolved, multifactorial and non-linear problem [1–16]. The uncertainty of the thermo-physical and chemical properties of forest combustible materials does not allow a reliable calculation of the heat flux from a forest fire affecting energy facilities, such as electrical substations, thermal power plants, hydro-electric power stations, power lines, etc. In this regard, the study of the wood pulp combustion of Vietnamese trees is an actual scientific and practical problem.

The purpose of the article is to substantiate the source data for the mathematical modeling of the parameters and heat impact of running crowning forest fires on power engineering facilities in Vietnam.

To achieve this, the experimental studies of the combustion of wood pulp samples from the most common hardwood and coniferous trees of Vietnam were carried out.

### Experimental facility and methodology of the experiments

Fig. 1 shows the scheme of the experimental facility proposed in the works [17–19].



**Fig. 1.** Experimental facility functional diagram: 1 — combustion chamber; 2 — combustion chamber door; 3 — sample holder; 4 — electric heater; 5 — transition sleeve; 6 — exposure chamber door; 7 — exposure chamber; 8 — slide apertures; 9 — fan; 10 — fire screen (partition) of the transition sleeve; 11 — table with scales

The facility consists of a combustion chamber 1, which is connected to the exposure chamber 7 using the transition sleeve 5.

The internal volume of the combustion chamber is equal to  $3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ . Its walls are made of thick stainless steel sheet with the thickness of  $(2.0 \pm 0.1) \text{ mm}$ . Observations on samples of materials are carried out through a window made of quartz glass during testing. The selection of the test mode using the air exchange of the chamber with the room is carried out through the slide apertures on the side wall of the chamber.

The device for thermal blocking of the exposure chamber from the combustion chamber is located in the transition sleeve.

There are slide apertures 8 on the side wall of the exposure chamber with a cubic volume of  $0.5887 \text{ m}^3$  and with the upper part in the form of a cone.

Shielded electric heater 4 and the sample holder 3 are placed in the combustion chamber.

Electronic scales 11 on which the sample holder is located, allow you to measure the sample mass with an error not exceeding  $\pm 1 \text{ mg}$ . The scales are installed on the table, which position is adjustable up/down.

Temperature measurements in the exposure chamber are carried out continuously using 32 low inertia armored thermocouples. The range of measured temperatures is from minus 40 to  $+1100 \text{ }^\circ\text{C}$ . Measurement error does not exceed  $\pm 1.5t \text{ (}^\circ\text{C)}$ .

The density of the heat flux coming from the shielded electric heater to the surface of the sample material is measured by a water-cooled Gordon sensor with an error not exceeding  $\pm 8 \%$ .

The composition of the gas-air environment in the exposure chamber is determined using a multichannel gas analyzer with ranges of gas concentrations measuring (with maximum accuracy of  $\pm 10 \%$  by vol.) carbon monoxide CO — 0–1 % by vol., carbon dioxide CO<sub>2</sub> — 0–5 % by vol., oxygen O<sub>2</sub> — 0–21 % by vol.

The tests were carried out in the mode of flame combustion, which was provided by the density of the incoming heat flux of  $60 \text{ kW/m}^2$ . The surface temperature of the heater was  $750 \text{ }^\circ\text{C}$ .

The experiments were carried out according to the following method.

A previously weighed sample of the material having a room temperature was placed on the sample holder seat.

After stabilization of the operation mode of the electric heater, the combustion chamber door was opened and the seat with the wood sample was placed in the sample holder. Then the fire screen of the transition sleeve was opened, and the combustion chamber door was closed. The sample ignited.

During the experiment, concentrations CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> were continuously measured, as well as sample temperature and mass.

Further, the specific mass gasification rate  $\Psi_{spec}$  ( $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{sec})$ ) was determined by the following formula:

$$\Psi_{spec} = \frac{1}{F} \frac{dM}{d\tau}, \quad (1)$$

where  $F$  — sample surface area,  $\text{m}^2$ ;

$M$  — current sample weight,  $\text{kg}$ ;

$\tau$  — test time,  $\text{sec}$ .

To predict the toxicological situation with regard to forest fires, it is necessary, first of all, to know the concentration of carbon monoxide, therefore, in experiments, the specific carbon monoxide formation coefficient was determined  $L_{CO}$  at every instant according to the following formula:

$$L_{CO} = \frac{V}{\Psi_{spec} F} \frac{d\rho_{CO}}{d\tau}, \quad (2)$$

where  $V$  — exposure chamber volume,  $\text{m}^3$ ;

$\rho_{CO}$  — medium volume density CO in the exposure chamber,  $\text{kg}/\text{m}^3$ .

### Input data

In order to perform mathematical modeling of the parameters and thermal effects of running crowning forest fires, it is necessary, first of all, to know the lowest working heat of combustion  $Q_{low}^{work}$  ( $\text{MJ}/\text{kg}$ ) and specific mass gasification rate of wood pulp.

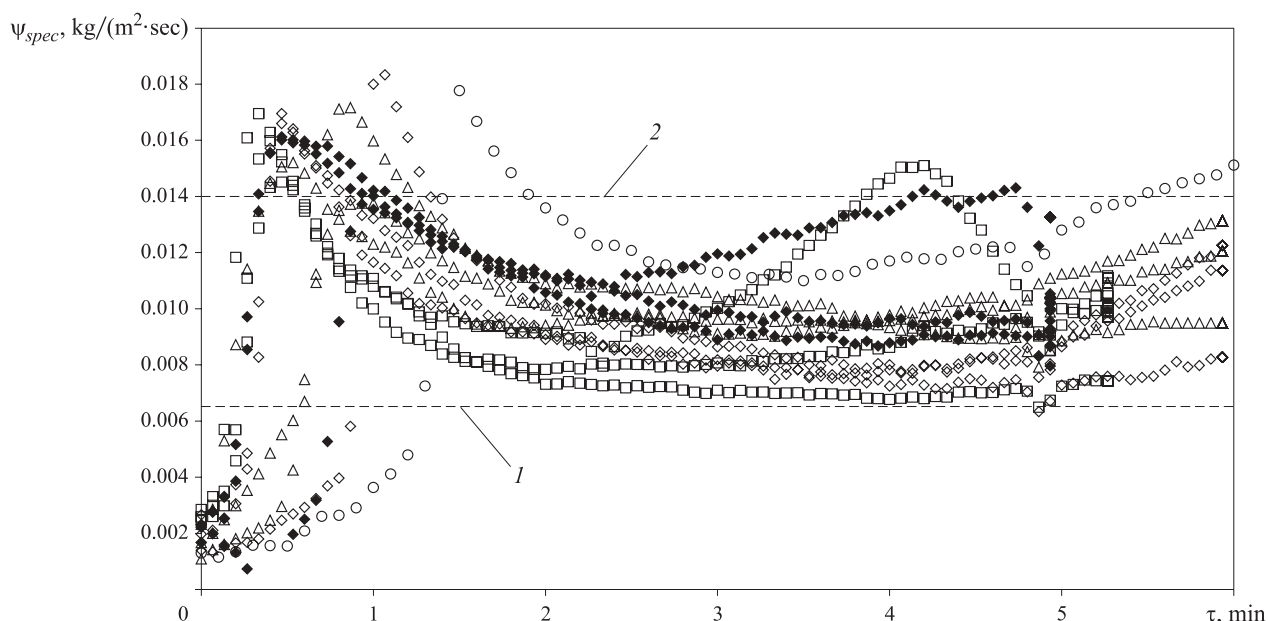
The data analysis given in the works [20, 21], shows that the lowest working heat of combustion of coniferous and hardwood wood is in the range  $Q_{low}^{work} = 13.8 \div 21.2 \text{ MJ}/\text{kg}$ . Therefore, if its average value of  $17.5 \text{ MJ}/\text{kg}$  is used, the error compared to its true value does not exceed 27 %.

We will carry out measurements of the specific mass gasification rate of wood pulp samples of Vietnam trees, shown in Table 1. The sizes of the wood samples were  $0.1 \times 0.1 \times 0.02 \text{ m}$ .

The moisture content of the samples was measured with ZNT 125 Electronic moisture meter with measuring range 5–50 % and error measurement  $\pm 2 \%$ . The samples humidity did not exceed 8 % (see Table 1), which cor-

**Table 1.** The considered tree species of Vietnam

| Number of sample | Name (english, vietnamese)                   | Tree kind  | Humidity, % |
|------------------|--|------------|-------------|
| 1                | Acacia auriculiformis, keo                   | Deciduous  | < 5         |
| 2                | Chinaberry, xoan                             |            | < 5         |
| 3                | Pine, họ thông                               | Coniferous | < 5         |
| 4                | Eucalyptus camaldulensis dehnhardt, bạch đàn | Deciduous  | 8           |
| 5                | Dimocarpus longan, nhãn                      |            | 7           |



**Fig. 2.** The dependence of the specific mass gasification rate of wood pulp from the period of sample testing: □ — No. 1; △ — No. 2; ◆ — No. 3; ○ — No. 4; ◇ — No. 5; 1 — coniferous trees,  $\Psi_{spec} = 0.0063 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{sec})$ ; 2 — hardwood trees,  $\Psi_{spec} = 0.014 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{sec})$  [21]

responds to the humidity of Vietnamese trees in the most fire-hazardous dry period of the year.

### Study results and their analysis

Fig. 2 shows the experimental dependence of the specific gasification rate of wood samples on the test time period.

Fig. 2 shows that local values  $\Psi_{spec}$  after 2 minutes of tests are in the range of 0.0063 up to 0.014  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{sec})$ , where lower limit corresponds to the combustion of coniferous trees, and the upper — hardwood ones [21].

Fig. 3 shows the experimental dependence of the specific carbon monoxide formation coefficient on the time period. Analysis of the experimental results shows that the value of the specific carbon monoxide formation coefficient is negligible at the initial stage of testing. This is explained by the fact that during this period the oxygen concentration is almost constant and is equal to the concentration in the air of the room and carbon monoxide is oxidized to dioxide  $\text{CO}_2$ . As the concentration of  $\text{O}_2$  decreases concentration of  $\text{CO}$  increases rapidly.

Mean values during the experiment  $\Psi_{spec}$  and  $L_{\text{CO}}$  shown in table 2.

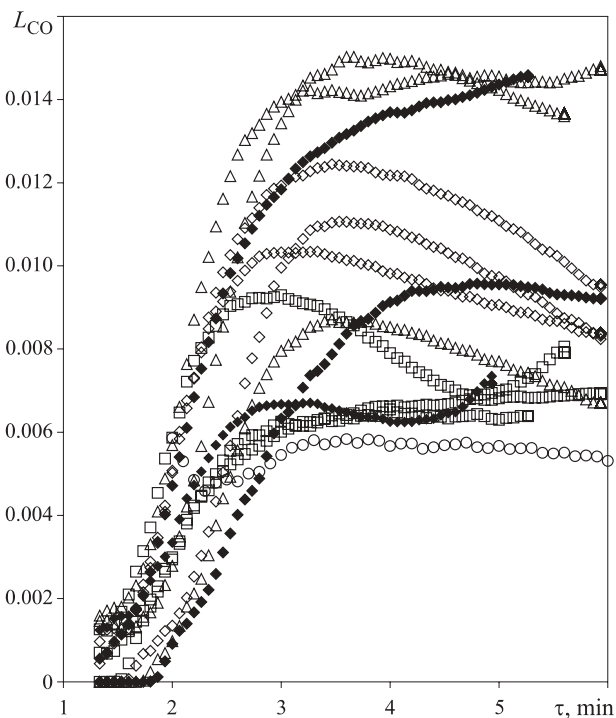
It can be seen from table 2 that:

- experimental mean values  $\Psi_{spec}$  are in the range of 0.0063  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{sec})$  for coniferous trees 0.014  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{sec})$  — for hardwood trees [21];
- experimental mean values  $L_{\text{CO}}$  are significantly less (more than 2 times) compared to those ones given in the database [21].

It can be seen from Fig. 2 that the dependences of the specific mass gasification rate of wood on the time

period have a maximum at the beginning of the gasification process. The time period taken to reach the maximum values does not exceed 0.5–2 minutes, depending on the type of wood, after which there is a relative stabilization of wood gasification process.

The values of the specific carbon monoxide formation coefficient according to Fig. 3 approximately in 2 minutes after the start of combustion is negligible. Then



**Fig. 3.** The dependence of the specific carbon monoxide formation coefficient from the period of sample testing: □ — No. 1; △ — No. 2; ◆ — No. 3; ○ — No. 4; ◇ — No. 5



**Table 2.** Average values  $\psi_{spec}$  и  $L_{CO}$  during the experiment

| Number of sample | $\psi_{spec}$ (kg/(m <sup>2</sup> ·sec)) |        | $L_{CO}$     |       |
|------------------|--|--------|--------------|-------|
|                  | This article                             | [21]   | This article | [21]  |
| 1                | 0.0093                                   | 0.014  | 0.0052       | 0.024 |
| 2                | 0.0102                                   |        | 0.0107       |       |
| 3                | 0.0113                                   | 0.0063 | 0.0073       |       |
| 4                | 0.0127                                   | 0.014  | 0.012        |       |
| 5                | 0.0091                                   |        | 0.008        |       |

within 1–2 minutes (depending on wood species) there is their sharp growth to the maximum values. This results from the fact that eventually there is a reduction of oxygen concentration in the combustion chamber (see Fig. 1) and not all carbon monoxide is oxidized to dioxide.

The obtained average experimental values of the specific mass gasification rate and the specific carbon monoxide formation coefficient for pulp samples of the most common hardwood and coniferous trees of Vietnam can be used to calculate the characteristics of running crowning fires.

### Conclusion

Experimental studies of combustion process wood pulp samples of the most widespread hardwood and coniferous tree species of Vietnam allow to prove the choice of values of the specific carbon monoxide formation coefficient and the specific mass gasification rate, required for mathematical modeling of the parameters and heat impact of running crowning forest fires on the power engineering facilities in Vietnam.

### REFERENCES

1. S. V. Puzach, S. S. Goriushkin. Assessment of the forest fire thermal effect on the electrical substation with oil transformers. *Pozhary i chrezvychaynyye situatsii: predotvrashcheniye, likvidatsiya / Fire and Emergencies: Prevention, Elimination*, 2017, no. 3, pp. 79–83 (in Russian). DOI: 10.25257/FE.2017.3.79-83.
2. G. A. Dorrer. *Dinamika lesnykh pozharov* [Dynamics of forest fires]. Novosibirsk, Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2008. 403 p. (in Russian).
3. A. M. Grishin. About mathematical modelling natural fires and catastrophes. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika / Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*, 2008, no. 2(3), pp. 105–114 (in Russian).
4. M. E. Alexander, M. G. Cruz, N. M. Vaillant. Toward improving our application and understanding of crown fire behavior. *Fire Management Today*, 2014, vol. 73, no. 4, pp. 46–47.
5. D. Morvan. Physical phenomena and length scales governing the behaviour of wildfires: a case for physical modelling. *Fire Technology*, 2011, vol. 47, issue 2, pp. 437–460. DOI: 10.1007/s10694-010-0160-2.
6. J. Mandel, L. S. Bennethum, J. D. Beezley, J. L. Coen, C. C. Douglas, M. Kim, A. Vodacek. A wildland fire model with data assimilation. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2008, vol. 79, issue 3, pp. 584–606. DOI: 10.1016/j.matcom.2008.03.015.
7. A. L. Sullivan. Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007. 3: Simulation and mathematical analogue models. *International Journal of Wildland Fire*, 2009, vol. 18, no. 4, pp. 387–403. DOI: 10.1071/wf06144.
8. M. C. Rochoux, C. Emery, S. Ricci, B. Cuenot, A. Trouvé. Towards predictive data-driven simulations of wildfire spread — Part II: Ensemble Kalman Filter for the state estimation of a front-tracking simulator of wildfire spread. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2015, vol. 15, no. 8, pp. 1721–1739. DOI: 10.5194/nhess-15-1721-2015.
9. M. C. Rochoux, S. Ricci, D. Lucor, B. Cuenot, A. Trouvé. Towards predictive data-driven simulations of wildfire spread — Part I: Reduced-cost Ensemble Kalman Filter based on a Polynomial Chaos surrogate model for parameter estimation. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2014, vol. 14, no. 11, pp. 2951–2973. DOI: 10.5194/nhess-14-2951-2014.
10. C. Tymstra, R. W. Bryce, B. M. Wotton, O. B. Armitage. *Development and structure of Prometheus: the Canadian wildland fire growth simulation model*. Information Report NOR-X-417. Edmonton, Natural Resources of Canada, Canadian Forest Service, 2010.
11. N. Sardoy, J.-L. Consalvi, B. Porterie, A. C. Fernandez-Pello. Modeling transport and combustion of firebrands from burning trees. *Combustion and Flame*, 2007, vol. 150, issue 3, pp. 151–169. DOI: 10.1016/j.combustflame.2007.04.008.
12. I. Kaur, A. Mentrelli, F. Bosseur, J.-B. Filippi, G. Pagnini. Turbulence and fire-spotting effects into wild-land fire simulators. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulations*, 2016, vol. 39, pp. 300–320. DOI: 10.1016/j.cnsns.2016.03.003.
13. J. Martin, T. Hillen. The spotting distribution of wildfires. *Applied Sciences*, 2016, vol. 6, no. 6, pp. 177. DOI: 10.3390/app6060177.

14. P. Cunningham, S. L. Goodrick, M. Y. Hussaini, R. R. Linn. Coherent vortical structures in numerical simulations of buoyant plumes from wildland fires. *International Journal of Wildland Fire*, 2005, vol. 14, issue 1, pp. 61–75. DOI: 10.1071/wf04044.
15. S. L. Kuznetsov, S. V. Puzach, A. V. Yaroshenko. Mathematical model of the spread of the edge of a natural fire, taking into account the main features of vegetation, terrain landscape and state of the atmosphere. In: *Materialy 20-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Sistemy bezopasnosti-2011"* [Materials of the 20<sup>th</sup> Scientific and Technical Conference "Security Systems-2011"]. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2011, p. 195–197 (in Russian).
16. J. M. Varner, C. R. Keyes. Fuels treatment and fire models: errors and corrections. *Fire Management Today*, 2009, vol. 69, no. 3, pp. 47–50.
17. S. V. Puzach, E. V. Suleykin. New united theoretical and experimental approach to the calculation of the distribution of toxic gases in case of fire in the room. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2016, vol. 25, no. 2, pp. 13–20 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2016.25.02.13-20.
18. S. V. Puzach, R. G. Akperov. Experimental determination of the specific coefficient of release of carbon monoxide during a fire in the room. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2016, vol. 25, no. 5, pp. 18–25 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2016.25.05.18-25.
19. S. V. Puzach, E. V. Suleikin, R. G. Akperov, V. G. Puzach. About experimental toxicity assessment of combustion products at fire in premise. *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti / Technology of Technosphere Safety*, 2013, issue 4(50). 11 p. (in Russian).
20. A. V. Ivanov. *Lesnaya pirologiya* [Forest pyrology]. 2<sup>nd</sup> ed. Yoshkar-Ola, Volga State University of Technology Publ., 2013. 275 p. (in Russian).
21. Yu. A. Koshmarov. *Prognozirovaniye opasnykh faktorov pozhara v pomeshchenii* [The prediction of dangerous fire factors in the room]. Moscow, State Fire Academy of Ministry of Internal Affairs of Russia Publ., 2000. 118 p. (in Russian).

Received 9 October 2018

**For citation:** S. V. Puzach, Tuan Anh Le. Justification of the choice of wood pulp combustion parameters for calculation of running crowning forest fires impact on power engineering facilities in Vietnam. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2018, vol. 27, no. 11, pp. 5–14 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2018.27.11.5-14.



## Издательство «ПОЖНАУКА»

Представляет книгу



Д. Г. Пронин, Д. А. Корольченко

### ДЕЛЕНИЕ ЗДАНИЙ НА ПОЖАРНЫЕ ОТСЕКИ : учебное пособие.

— М. : Издательство "ПОЖНАУКА".

В учебном пособии изложены базовые основы, действующие требования и современные представления о целях, задачах и способах ограничения распространения пожара по зданиям и сооружениям путем их разделения на пожарные отсеки.

Пособие предназначено для студентов Московского государственного строительного университета. Оно может быть использовано также другими образовательными учреждениями и практическими работниками, занимающимися вопросами обеспечения пожарной безопасности.

121352, г. Москва, а/я 6; тел./факс: (495) 228-09-03; e-mail: info@fire-smi.ru

**Н. Г. ТОПОЛЬСКИЙ**, д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, профессор кафедры информационных технологий, Академия ГПС МЧС России (Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; e-mail: ntopolskii@mail.ru)

**И. В. САМАРИН**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры автоматизации технологических процессов, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина (Россия, 119991, г. Москва, Ленинский просп., 65, корп. 1; e-mail: ivs@gubkin.ru)

**А. Ю. СТРОГОНОВ**, аспирант кафедры автоматизации технологических процессов, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина (Россия, 119991, г. Москва, Ленинский просп., 65, корп. 1)

УДК 681.5

## МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОМПЛЕКСНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В АСУТП С ПРИМЕНЕНИЕМ ДИАГНОСТИКИ ПОЖАРНЫХ ИЗВЕЩАТЕЛЕЙ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ УПРАВЛЕНИЯ ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬЮ

Изучены особенности оценки оборудования первого уровня автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) как составных частей цепочки обеспечения безопасности объектов топливно-энергетического комплекса (ТЭК) с учетом плановых стабилизирующих процедур в особых условиях. Представлено обоснование выбора критерия оценки надежности работы извещателей АСУТП. При построении математической модели оценки надежности автоматизированной системы пожаровзрывобезопасности на объекте ТЭК выбран интегральный показатель качества. Описан способ оценки надежности с использованием вектора целей планирования. Дана характеристика четырем локальным показателям качества. Рассмотрен пример анализа ресурсного показателя. Обосновано применение инструментария стратегического планирования для достижения поставленной в статье задачи.

**Ключевые слова:** автоматизация; датчики; стабилизирующие процедуры; цифровой двойник; показатели качества; оценка надежности; математическая модель; стратегическое планирование.

**DOI:** 10.18322/PVB.2018.27.11.15-22

### Введение

Объекты топливно-энергетического комплекса (ТЭК) являются составной частью экономики страны. Они выполняют одну из важнейших ее функций — обеспечение предприятий и организаций РФ топливом и продуктами переработки нефти и газа. Одним из основных материалов, перерабатываемых на них, являются легковоспламеняющиеся вещества, создающие реальную угрозу возникновения пожаров и взрывов. Для предотвращения опасных событий, связанных с подобными проявлениями, на объектах ТЭК предпринимаются меры безопасности [1]. Комплекс таких мер, в том числе мероприятий по предотвращению пожаров и взрывов, и определяет состояние комплексной безопасности на данных объектах [2].

В связи с интенсификацией технологических процессов на объектах ТЭК, вызванных обострением конкуренции, автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУТП) требуют не только постоянного обновления, но и своевременной диагностики уже установленного оборудования, что увеличивает нагрузку на персонал. В этих условиях вырастает риск невынужденных ошибок персонала и связанных с ними событий по неправильной или несвоевременной диагностике оборудования АСУТП, отвечающего за контроль процессов пожарной безопасности.

Принято считать, что наиболее эффективным средством контроля и работы по защите объектов от пожаров и взрывов в АСУТП является автома-

тизированная система пожаровзрывобезопасности (АСПВБ) [3]. Ее применение обеспечивает высокий уровень контроля технологического оборудования в ходе производственных процессов.

Целью статьи является построение математической модели оценки комплексной безопасности объектов ТЭК в АСУТП. Оценка выполняется в особых условиях проведения мероприятий по предупреждению пожаров, а именно проверки извещателей (датчиков). Решение поставленной задачи начинается с выбора функции оценки как зависимости извещателя от вектора целей управления объектом ТЭК. Введен интегральный показатель качества обеспечения надежности АСУТП как сумма соответствующих локальных показателей. При моделировании оценка надежности работы АСПВБ на объекте ТЭК осуществляется путем диагностики с использованием вектора целей планирования.

### Методы исследования

Диагностические мероприятия по предупреждению пожаров на объектах ТЭК включают в себя следующие профилактические меры [4]:

- периодические проверки состояния пожарной безопасности объекта ТЭК в целом и его отдельных участков, а также обеспечение контроля за своевременным выполнением этих мероприятий;
- проведение пожарно-технических обследований объекта ТЭК представителями Государственного пожарного надзора с вручением предписаний; установление действенного контроля за выполнением выданных предписаний и приказов руководителя объекта ТЭК, изданных по ним;
- постоянный контроль над проведением пожароопасных работ, выполнением противопожарных требований на объекте ТЭК;
- проведение инструктажей и специальных занятий с рабочими и служащими объекта ТЭК по вопросам пожарной безопасности и других мероприятий по противопожарной пропаганде и агитации;
- проверку исправности и правильного содержания стационарных автоматических и первичных средств пожаротушения, противопожарного водоснабжения и систем извещения о пожарах;
- установку в цехах, мастерских, на складах и отдельных агрегатах систем пожарной автоматики.

При этом периодичность проверки готовности оборудования к пожарам на объекте ТЭК должна быть не реже 1 раза в квартал [5]. Планирование ресурсов для таких проверок осуществляется по заявкам обслуживающего персонала.

Ежемесячно ответственным персоналом объекта ТЭК должен также проводиться визуальный контроль давления в модуле газоанализатора (датчика)

по показаниям манометра модуля. Наблюдаемая отметка давления должна находиться в пределах затемненного поля для заданного значения температуры окружающей среды. Если она лежит ниже этой границы, модули датчика подлежат перезарядке. Результаты проверки фиксируют в специальном журнале.

Кроме того, 1 раз в 6 месяцев проводят:

- внешний осмотр и контроль составных частей установок (технологической части — трубопроводов, распылителей, рукавов, баллонов с огнетушащим веществом, манометров и распределительных устройств) на отсутствие механических повреждений, грязи, прочность крепления, наличие пломб;
- контроль рабочего положения основной и резервной запорной арматуры на составных частях установок.

Результаты проверки фиксируют в специальном журнале.

В состав ежегодных контрольных и планируемых мероприятий по предупреждению пожаров входят:

1) метрологическая поверка манометров. Для этого их извлекают из мест установки и отправляют в контрольно-измерительную лабораторию на поверку, после чего возвращают на место, предварительно проверив его;

2) метрологическая поверка манометров на всех объектах защиты (ОЗ), входящих в состав объекта ТЭК;

3) измерение сопротивления изоляции электрических цепей на противопожарном оборудовании и датчиках;

4) замена составных частей модулей датчиков, имеющих ограниченные сроки эксплуатации, если установлены факты несоответствия поступающей от них информации реальному состоянию среды.

Стоимость всех перечисленных работ в зависимости от размеров объекта ТЭК и объемов его помещений может меняться.

Теперь разберем подробнее ограничения особых условий и попробуем отразить это в критериях оценки диагностических мероприятий и мероприятий по повышению уровня комплексной (в том числе пожарной) безопасности. Согласно [6] износ изначально поставленного технологического оборудования на многих объектах ТЭК должен составлять не менее 80–100 % из-за большого срока эксплуатации. Некоторые узлы, устаревшие и физически, и морально, требуют либо замены, либо коренной модернизации. В этом смысле цифровые двойники не оставляют выбора руководителям объекта ТЭК [7]. Такие узлы меняют на импортное оборудование: датчики загазованности Draeger [8], отсечные клапаны Emerson, многокомпонентные анализаторы Modcon.



Кроме указанных узлов зарубежного производства, в настоящее время на объектах ТЭК применяются импортные системы контроля, диагностики и обеспечения пожарной безопасности [9, 10]. Во многом это обусловлено использованием в качестве АСУТП иностранных программных реализаций отдельных элементов технологического оборудования. Цифровые двойники, помимо ряда существенных преимуществ [11], имеют и недостатки [12]. Главный из них состоит в том, что их внедрение делает производственный процесс на объектах ТЭК фактически зависимым от иностранных технологий. Следовательно, применение к объектам ТЭК особых условий при использовании достижений “Индустрии 4.0” приведет к серьезным затруднениям в обеспечении как самого производственного процесса, так и комплексной безопасности объекта ТЭК.

Перечисленные противопожарные и профилактические мероприятия на объекте ТЭК призваны проиллюстрировать реальные цели плановых мероприятий по повышению надежности работы АСПВБ в АСУТП при диагностировании оборудования. Будем называть их стабилизирующими процедурами.

Рассмотрим с математической точки зрения модель обеспечения комплексной безопасности в АСУТП объектов ТЭК с учетом диагностики пожарных извещателей в особых условиях. Именно пожарные извещатели (датчики) могут быть наиболее чувствительным местом всей цепочки обеспечения безопасности [13, 14]. В связи с этим для определения зависимости их работы от стабилизирующих процедур (диагностики, проверок, ремонта, замены и т. п.) имеет смысл рассматривать функцию оценки отдельным выбранным датчиком состояния среды как его зависимость от вектора целей управления объектом ТЭК:

$$I_i = f_i(P), \quad (1)$$

где  $I_i$  — значение  $i$ -го извещателя с заданным порогом срабатывания;

$P$  — вектор целей планирования (обеспечения достоверности информации) при управлении комплексной безопасностью объекта ТЭК;  $P = \{P_1, P_2, \dots, P_K\}$ .

Обстоятельства срабатывания датчиков зависят от стабилизирующих процедур и от времени их работы, поэтому формулу (1) следует переписать в виде

$$I_i = f_i(P_1(t_i^2), t_i^2, P_3(t_i^2)), \quad (2)$$

где  $t_i^2$  — время работы датчиков;

$P_1(t_i^2)$  — цели планирования стабилизирующих процедур, продлевающих время работы датчиков;

$P_3(t_i^2)$  — цели планирования стабилизирующих процедур, обеспечивающих их надежное срабатывание.

Оба направления работ персонала АСУТП подразумевают выполнение мероприятий, входящих в пересекающиеся, но несовпадающие множества. При их объединении в едином плановом задании по обеспечению надежности информации первого уровня в АСУТП [15] получаем:

$$I_i = f_i(P_i(t), t). \quad (3)$$

Так как функция  $f_i(P_i(t), t)$  представляет собой кривую, для критерия оценки надежности работы первого уровня АСУТП в  $j$ -м кластере можно определить локальный показатель качества  $w_j^P$  для  $j$ -го кластера защиты:

$$w_j^P = \sum_{i=1}^{N_j} \int f_i(P_i(t), t) dt, \quad j \in \{1, 2, \dots, M\}, \quad (4)$$

где  $N_j$  — число мероприятий согласно планам достижения  $j$ -й цели;

$M$  — число рассматриваемых кластеров, объединяющих датчики для заданного элемента (группы помещений, здания, сооружения) объекта ТЭК.

Интегральный показатель качества для объекта защиты ТЭК  $W_{O3}^P$  задается вектором

$$W_{O3}^P = \{w_1^P, w_2^P, \dots, w_M^P\}, \quad (5)$$

в котором  $w_i^P$  рассчитываются по формуле (4).

Формула (3) устанавливает функциональную зависимость работы датчика от целей плановых мероприятий. При этом сама функция целей имеет более сложный характер, чем указано в экспликации к (1).

Рассмотрим способ оценки надежности работы АСПВБ на объекте ТЭК путем диагностики с использованием вектора целей планирования:

$$P = \{V, F, R, W\}, \quad (6)$$

где  $V$  — общий потребный объем проводимых мероприятий, измеряемый в условных единицах (одно мероприятие — одна единица объема);

$F$  — общее финансирование мероприятий в достижении целей, запланированных для повышения надежности АСПВБ;

$R$  — общие запланированные для проведения мероприятий ресурсы, необходимые для гарантированного достижения поставленных целей повышения надежности АСПВБ;

$W$  — общие затраты трудовых ресурсов в нормочасах, необходимые для гарантированного достижения запланированных целей повышения надежности АСПВБ.

Поскольку весь комплекс необходимых мероприятий комплексной безопасности на объекте ТЭК представляет собой многоуровневое дерево, во избежание загромождения модели оценки рассмотрим только их простую сумму [16]. Тогда общий потреб-



ный объем проводимых мероприятий, измеряемый в условных единицах, будет иметь вид:

$$V = \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^{N_j} m_i, \quad (7)$$

где  $K$  — число целей планирования (обеспечения достоверности информации) при управлении комплексной безопасностью на нефтеперерабатывающих производствах (НПП);

$m_i$  — единичное мероприятие согласно плану достижения  $j$ -й цели;

$$m_i = \begin{cases} 0, & \text{не выполнено;} \\ 1, & \text{выполнено.} \end{cases} \quad (8)$$

Общее финансирование запланированных целей повышения надежности АСПВБ можно представить в виде

$$F = \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^{N_j} F_i, \quad (9)$$

где  $F_i$  — финансирование единичного мероприятия согласно плану для достижения  $j$ -й цели;

$$F_i = \begin{cases} 0, & \text{отсутствует;} \\ F_i, & \text{запланировано.} \end{cases} \quad (10)$$

Общие запланированные для проведения мероприятий ресурсы, необходимые для гарантированного достижения поставленных целей повышения надежности АСПВБ, представим в виде

$$R = \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^{N_j} R_i, \quad (11)$$

где  $R_i$  — ресурсы, выделенные для обеспечения выполнения единичного мероприятия согласно плану для достижения  $j$ -й цели;

$$R_i = \begin{cases} 0, & \text{отсутствуют;} \\ R_i, & \text{запланированы.} \end{cases} \quad (12)$$

Общие затраты трудовых ресурсов в нормочасах, необходимые для гарантированного достижения запланированных целей повышения надежности АСПВБ, можно определить как

$$W = \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^{N_j} W_i, \quad (13)$$

где  $W_i$  — нормочасы, предусмотренные для выполнения единичного мероприятия согласно плану для достижения  $j$ -й цели;

$$W_i = \begin{cases} 0, & \text{не предусмотрены;} \\ W_i, & \text{запланированы.} \end{cases} \quad (14)$$

В случае если мероприятия по обеспечению надежности АСУТП и ее диагностирование на первом уровне получения информации согласно целям пла-

нирования будут выражены в таком виде, то локальные показатели качества можно рассматривать в виде сумм (7), (9), (11) и (13). В этом случае интегральный показатель качества обеспечения надежности и иных задач АСУТП будет представлен в виде суммы соответствующих локальных показателей. В этом безразмерном контейнере данных будут учтены все необходимые для выполнения мероприятий показатели. Однако использовать его в качестве оценки можно только в теоретическом плане, так как финансирование и ресурсы будут давать львиную долю его значения.

### Анализ результатов

Правильнее было бы рассматривать приведенные локальные показатели отдельно, поэтому для вывода об особых условиях эксплуатации оборудования и систем обеспечения объектов ТЭК, входящих в АСУТП, рассмотрим только ресурсный показатель качества.

Предположим, что на объекте ТЭК используется 40 % отечественных датчиков и 60 % датчиков зарубежного производства. Предположим также, что их эксплуатация требует соответствующего технического обслуживания (ТО), без которого они начинают работать некачественно (порог среды слишком сильно расходится с порогом срабатывания). При этом импортные датчики обслуживаются только иностранным производителем. В особых условиях, как было сказано выше, мероприятия по финансированию и любым иным действиям прекращаются. Следовательно, величина соответствующих  $R_i$  стремится к 0.

В этом случае коэффициент сокращения ресурсов  $r$ , доступных лицу, принимающему решения (ЛПР), для обеспечения безопасности в АСПВБ и надежности в АСУТП в особых условиях можно представить формулой

$$r = R_{oc} / R_{об}, \quad (15)$$

где  $R_{oc}$ ,  $R_{об}$  — локальные показатели качества по формуле (11) соответственно при особых и обычных условиях.

Для упрощения расчета будем полагать, что в состав используемых ресурсов входят датчики (газоанализаторы, пожарные извещатели), приборы их проверки и комплектующие, используемые в ремонте. Исходя из того, что и эти ресурсы имеют иностранное происхождение, будем считать, что все датчики, используемые в цифровых двойниках, импортные.

Тогда, предполагая, что запланированные ресурсы  $R_i$  отечественного производства не изменятся при переходе от обычных условий к особым, из (15) видим, что значение  $R_{oc}$  в числителе будет по ряду по-

зиций составлять только 40 % от значения  $R_{об}$  в знаменателе. Из этого можно сделать однозначный вывод, что особые условия значительно снижают показатели надежности и качества информирования ЛПР в АСУТП на объекте ТЭК. Это снижение пропорционально количеству применяемых в соответствующих системах единиц оборудования импортного производства.

Отчасти это положение можно преодолеть планированием дополнительных финансовых и трудовых ресурсов. Тогда на дополнительные финансовые ресурсы может быть закуплено (или разработано) и установлено соответствующее оборудование, исходя из запланированных дополнительных трудовых ресурсов.

Такое положение с учетом общего времени проведения работ можно закрепить путем обоснованного стратегического планирования [17], агрегатной целью которого будет повышение надежности и живучести АСУТП в особых условиях. Следовательно, инструментарий стратегического планирования, включаемый в общий пакет возможностей поддержки управления ЛПР в качестве информационно-аналитической системы [18–20], будет способствовать достижению данной цели, а значит, и решению проблемы обеспечения комплексной безопасности в АСУТП (ее живучести и надежности)

на объектах ТЭК в особых условиях [21, 22]. Следует также отметить не рассмотренную в настоящей статье трудоемкую задачу определения объема мониторинга систем безопасности и противопожарной защиты. В работе [23] утверждается, что формирование объема мониторинга следует проводить с учетом экспертных оценок специалистов, вовлеченных в процесс работы данных систем. В предлагаемых методах стратегического планирования [17] рассмотрены способы анализа и сопряжения оценок экспертов для достижения поставленных целей. Такой инструмент будет полезен при возникновении необходимости расчета объема мониторинга требуемых систем.

### Заключение

Таким образом, инструменты методологии стратегического планирования [18–20], включаемые в подсистемы АСПВБ в качестве алгоритмов поддержки управления, позволят повысить надежность работы АСУТП на объектах ТЭК и обеспечить качественное диагностирование оборудования первого звена информирования ЛПР. Методы поддержки управления в АСУТП с использованием аппарата стратегического планирования обеспечат необходимое качество информации ЛПР и уровень надежности АСУТП в особых условиях.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dawoud S. M.* Fire protection in the petroleum industry // SPE Annual Technical Conference and Exhibition (11–14 November, 2007, Anaheim, California, USA). DOI: 10.2118/110521-ms.
2. *Смирнов А. В., Хабибулин Р. Ш., Тараканов Д. В.* Применение многоагентного подхода для поддержки управления безопасностью в техносфере // Вестник Иркутского государственного технического университета. — 2018. — Т. 22, № 1(132). — С. 118–133. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-1-118-133.
3. *Абросимов А. А., Топольский Н. Г., Федоров А. В.* Автоматизированные системы пожаровзрывобезопасности нефтеперерабатывающих производств. — М.: МИПБ МВД России, 1999. — 239 с.
4. РД 153-34.0-03.301-00 (ВППБ 01-02-95). Правила пожарной безопасности для энергетических предприятий. — М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004. — 128 с.
5. О противопожарном режиме: постановление Правительства Российской Федерации от 25.04.2012 № 390 (ред. от 30.12.2017). URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_129263/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_129263/) (дата обращения: 07.09.2018).
6. Проектирование НПЗ. URL: <http://neftegazproekt.com/proektirovanie-npz/> (дата обращения: 07.09.2018).
7. *Prakash J.* Digital twins define oil & gas 4.0. URL: <https://www.arcweb.com/blog/digital-twins-define-oil-gas-40> (дата обращения: 10.09.2018).
8. *Alexandre M., Gerboles M.* Review of small commercial sensors for indicative monitoring of ambient gas // Chemical Engineering Transactions. — 2012. — Vol. 30. — P. 169–174. DOI: 10.3303/CET1230029.
9. IRP 15: Snubbing Operations. An Industry Recommended Practice (IRP) for the Canadian oil and gas industry. — May 2015. — Vol. 15. — 167 p. URL: <http://www.enform.ca/resources/download-resource.cfm?resourceId=25&type=pdf> (дата обращения: 13.09.2018).
10. Construction Health and Safety Manual: Oil Refineries and Petrochemical Plants. URL: [https://www.ihsa.ca/rf/health\\_safety\\_manual/pdfs/locations/Oil\\_Refineries.pdf](https://www.ihsa.ca/rf/health_safety_manual/pdfs/locations/Oil_Refineries.pdf) (дата обращения: 13.09.2018).
11. *Альгин В. Б., Ишин Н. Н.* Надежность технически сложных изделий в свете “Индустрии 4.0” // Актуальные вопросы машиноведения. — 2017. — Т. 6. — С. 43–54.

12. Ромашкова И. А., Лосаберидзе Т. Л. Реализация концепции “цифрового двойника” в российском производстве как этап перехода к четвертой промышленной революции // Постулат. — 2018. — № 5-1(31). — С. 139.
13. Самарин И. В. Модель оценки обеспечения комплексной безопасности на рассредоточенном объекте защиты в обычных условиях при помощи булевых извещателей в АСУП без учета координат для построения автоматизированной системы управления формированием плана мероприятий по защите объектов ТЭК // Естественные и технические науки. — 2018. — Вып. 8(122). — С. 180–186.
14. Vogue R. Sensors for fire detection // Sensor Review. — 2013. — Vol. 33, No. 2. — P. 99–103. DOI: 10.1108/02602281311299635.
15. Андреев Е. Б., Ключников А. И., Кротов А. В., Попадько В. Е., Шарова И. Я. Автоматизация технологических процессов добычи и подготовки нефти и газа : учебное пособие для вузов. — М. : Недра-Бизнесцентр, 2008. — 399 с.
16. Сухарев М. Г., Арсеньев-Образцов С. С., Жукова Т. М. Основы математического и компьютерного моделирования в задачах нефтегазового комплекса : учебное пособие для вузов. — М. : МАКС Пресс, 2010. — 120 с.
17. Alekhin E. M., Brushlinsky N. N., Sokolov S. V., Wagner P. Russian simulation for strategic planning // Fire International. — 1996. — No. 154. — P. 32–33.
18. Самарин И. В. Формализация задачи обоснования среднесрочного плана деятельности для построения автоматизированной системы управления стратегического планирования на предприятии // Инновации и инвестиции. — 2014. — № 4 — С. 177–183.
19. Самарин И. В. АСУ стратегического планирования на предприятии: уточнение методологических и инструментальных основ схемы планирования // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. — 2017. — № 2. — С. 31–44.
20. Самарин И. В. Стратегическое планирование: модифицированный метод парных сравнений для задач высокой размерности // Труды Российского государственного университета нефти и газа имени И. М. Губкина. — 2016. — № 1/282. — С. 121–134.
21. Beata P. A., Jeffers A. E., Kamat V. R. Real-time fire monitoring and visualization for the post-ignition fire state in a building // Fire Technology. — 2018. — Vol. 54, Issue 4. — P. 995–1027. DOI: 10.1007/s10694-018-0723-1.
22. Novak T., Gerstinger A. Safety- and security-critical services in building automation and control systems // IEEE Transactions on Industrial Electronics. — 2010. — Vol. 57, No. 11. — P. 3614–3621. DOI: 10.1109/tie.2009.2028364.
23. Steblev Yu. I., Susarev S. V., Bykov D. E. The principles of designing automated systems for diagnostic monitoring of the engineering structures of hazardous production objects // Russian Journal of Nondestructive Testing. — 2015. — Vol. 51, No. 4. — P. 185–197. DOI: 10.1134/s1061830915040063.

*Материал поступил в редакцию 20 октября 2018 г.*

**Для цитирования:** Топольский Н. Г., Самарин И. В., Строгонов А. Ю. Модель оценки обеспечения комплексной безопасности в АСУТП с применением диагностики пожарных извещателей для построения автоматизированной системы поддержки управления пожаровзрывобезопасностью // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2018. — Т. 27, № 11. — С. 15–22. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.11.15-22.

English

## MODEL OF EVALUATION OF COMPREHENSIVE SAFETY IN THE APCS WITH THE USE OF DIAGNOSTIC FIRE DETECTORS FOR THE CONSTRUCTION OF AUTOMATED SYSTEMS OF SUPPORT OF MANAGEMENT OF FIRE AND EXPLOSION SAFETY

**N. G. TOPOLSKIY**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Honoured Science Worker of Russian Federation, Professor of Department of Information Technology, State Fire Academy of Emercom of Russia (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; e-mail: ntopolskii@mail.ru)

**I. V. SAMARIN**, Candidate of Technical Sciences, Docent, Assistant Professor of Department of Automation of Technological Processes, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) (Leninskiy Avenue, 65, Bldg. 1, Moscow, 119991, Russian Federation; e-mail: ivs@gubkin.ru)

**A. Yu. STROGONOV**, Postgraduate Student of Department of Automation of Technological Processes, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) (Leninskiy Avenue, 65, Bldg. 1, Moscow, 119991, Russian Federation)

## ABSTRACT

**Introduction.** Beginning this paper considers the important measures determining the state of integrated security of facilities of the fuel and energy complex. It says about necessity regular equipment diagnostics of automated process control system (APCS). There is a serious risk of unforced human error. So it says about special automated systems of fire and explosion safety such as means of control of APCS. It is necessary to keep in mind that automated system of fire and explosion protection (ASFEP) is a part automated control system of technological process. The study aims to build a mathematical model of comprehensive safety of objects of fuel and energy complex in APCS. A special evaluation function was chosen. This function is the dependence of the detector on the vector of controlling purposes. The method of assessing the reliability of ASFEP is described using the vector of planning purposes.

**Methodology.** Diagnostic fire prevention events are described. Besides their specificities and frequency are mentioned. It was agreed that implementing of digital twin depend to foreign technologies significantly. This fact actually affects of a sustainability of manufacturing process at facilities of the fuel and energy complex. To study the integrated security in the APCS a mathematical model was built. A detector is an important object constructed model. The corresponding function is formed for connection of detectors operation with stabilizing procedures. The criteria for assessing the reliability of the equipment of the first level of APCS were determined. The local and integral quality indicators are presented. In addition the vector of planning purposes is considered for assessing the reliability of automated system of fire and explosion protection.

**Results.** It is important to analyze the local indicators separately. As an example the resource indicator of quality is described. This example leads to an important conclusion about special conditions of functioning of the equipment. The possibility of using the methodology of strategic planning as a part of information and analytical system for increase of reliability and survivability of APCS is shown.

**Conclusion.** The paper concludes that the tools of strategic planning as a subsystems of automated system of fire and explosion protection are able to provide the necessary diagnostics of the equipment of the first level of informing the decision-maker.

**Keywords:** automation; detectors; stabilizing procedures; digital twin; quality indicators; assessing the reliability; mathematical model; strategic planning.

## REFERENCES

1. S. M. Dawoud. Fire protection in the petroleum industry. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition (11–14 November, 2007, Anaheim, California, USA)*. DOI: 10.2118/110521-ms.
2. A. V. Smirnov, R. Sh. Habibulin, D. V. Tarakanov. Use of multi-agent approach for technosphere safety management support. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta / Proceedings of Irkutsk State Technical University*, 2018, vol. 22, no. 1, pp. 118–133 (in Russian). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-1-118-133.
3. A. A. Abrosimov, N. G. Topolskiy, A. V. Fedorov. *Avtomatizirovannyye sistemy pozharovzryvobezopasnosti neftepererabatyvayushchikh proizvodstv* [Computer-aided fire and explosion safety systems of petroleum refineries]. Moscow, State Fire Academy of the Ministry of Internal Affairs of Russia Publ., 1999. 239 p. (in Russian).
4. RD 153-34.0-03.301-00 (VPPB 01-02–95). *Fire safety regulations for energy companies*. Moscow, NTs ENAS Publ., 2004. 128 p. (in Russian).
5. *About fire prevention standard*. Russian Federation Government Resolution on 25 April 2012 No. 390 (ed. 30 December 2017) (in Russian). Available at: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_129263/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_129263/) (Accessed 7 September 2018).



6. *The design of refinery* (in Russian). Available at: <http://neftegazproekt.com/proektirovanie-npz/> (Accessed 7 September 2018).
7. J. Prakash. *Digital twins define oil & gas 4.0*. Available at: <https://www.arcweb.com/blog/digital-twins-define-oil-gas-40> (Accessed 10 September 2018).
8. M. Aleixandre, M. Gerboles. Review of small commercial sensors for indicative monitoring of ambient gas. *Chemical Engineering Transactions*, 2012, vol. 30, pp. 169–174. DOI: 10.3303/CET1230029.
9. *IRP 15: Snubbing Operations. An Industry Recommended Practice (IRP) for the Canadian oil and gas industry*. May 2015, vol. 15. 167 p. Available at: <http://www.enform.ca/resources/download-resource.cfm?resourceId=25&type=pdf> (Accessed 13 September 2018).
10. *Construction Health and Safety Manual: Oil Refineries and Petrochemical Plants*. Available at: [https://www.ihsa.ca/rtf/health\\_safety\\_manual/pdfs/locations/Oil\\_Refineries.pdf](https://www.ihsa.ca/rtf/health_safety_manual/pdfs/locations/Oil_Refineries.pdf) (Accessed 13 September 2018).
11. V. B. Algin, N. N. Ishin. Reliability of technically complicated items in terms of “Industry 4.0”. *Aktualnyye voprosy mashinovedeniya. Topical Issues of Mechanical Engineering*, 2017, vol. 6, pp. 43–54 (in Russian).
12. I. A. Romashkova, T. L. Losaberidze. The implementation of the concept “digital twin” in the Russian production as the transition to the fourth industrial revolution. *Postulat / Postulate*, 2018, no. 5-1(31), p. 139 (in Russian).
13. I. V. Samarin. The model of assessment of integrated complex safety in dispersed OS under normal conditions using Boolean detectors in a process control system without given coordinates for building of automated control system of formation of the plan of measures for the protection of facilities of the fuel and energy complex. *Estestvennyye i tekhnicheskiye nauki / Natural and Technical Sciences*, 2018, no. 8(122), pp. 180–186 (in Russian).
14. R. Bogue. Sensors for fire detection. *Sensor Review*, 2013, vol. 33, no. 2, pp. 99–103. DOI: 10.1108/02602281311299635.
15. E. B. Andreev, A. I. Klyuchnikov, A. V. Krotov, V. E. Popadko, I. Ya. Sharova. *Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh protsessov dobychi i podgotovki nefiti i gaza* [Automation of technological processes of oil and gas production and treatment]. Moscow, Nedra-Biznestsentr Publ., 2008. 399 p. (in Russian).
16. M. G. Sukharev, S. S. Arsenev-Obraztsov, T. M. Zhukova. *Osnovy matematicheskogo i kompyuternogo modelirovaniya v zadachakh neftegazovogo kompleksa* [Fundamentals of mathematical and computer modeling in the problems of oil and gas complex]. Moscow, MAKS Press Publ., 2010. 120 p. (in Russian).
17. E. M. Alekhin, N. N. Brushlinsky, S. V. Sokolov, P. Wagner. Russian simulation for strategic planning. *Fire International*, 1996, no. 154, pp. 32–33.
18. I. V. Samarin. Formalization of the problem of the justification of the medium-term action plan to build the automated control system of strategic planning at the enterprise. *Innovatsii i investitsii / Innovation and Investment*, 2014, no. 4, pp. 177–183 (in Russian).
19. I. V. Samarin. ACS strategic planning at the enterprise: refinement of methodological and instrumental basics of planning schemes. *Sovremennaya nauka: aktualnyye problemy teorii i praktiki. Seriya: Yestestvennyye i tekhnicheskiye nauki / Modern Science: Actual Problems of Theory and Practice. Series: Natural and Technical Science*, 2017, no. 2, pp. 31–44 (in Russian).
20. I. V. Samarin. Strategic planning: modified method of pair comparisons for problems of high dimension. *Trudy Rossiyskogo gosudarstvennogo universiteta nefiti i gaza imeni I. M. Gubkina / Proceedings of Gubkin Russian State University of Oil and Gas*, 2016, no. 1/282, pp. 121–134 (in Russian).
21. P. A. Beata, A. E. Jeffers, V. R. Kamat. Real-time fire monitoring and visualization for the post-ignition fire state in a building. *Fire Technology*, 2018, vol. 54, issue 4, pp. 995–1027. DOI: 10.1007/s10694-018-0723-1.
22. T. Novak, A. Gerstinger. Safety- and security-critical services in building automation and control systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010, vol. 57, no. 11, pp. 3614–3621. DOI: 10.1109/tie.2009.2028364.
23. Yu. I. Steblev, S. V. Susarev, D. E. Bykov. The principles of designing automated systems for diagnostic monitoring of the engineering structures of hazardous production objects. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2015, vol. 51, no. 4, pp. 185–197. DOI: 10.1134/s1061830915040063.

**For citation:** Topolskiy N. G., Samarin I. V., Strogonov A. Yu. Model of evaluation of comprehensive safety in the APCS with the use of diagnostic fire detectors for the construction of automated systems of support of management of fire and explosion safety. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2018, vol. 27, no. 11, pp. 15–22 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2018.27.11.15-22.