

**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.

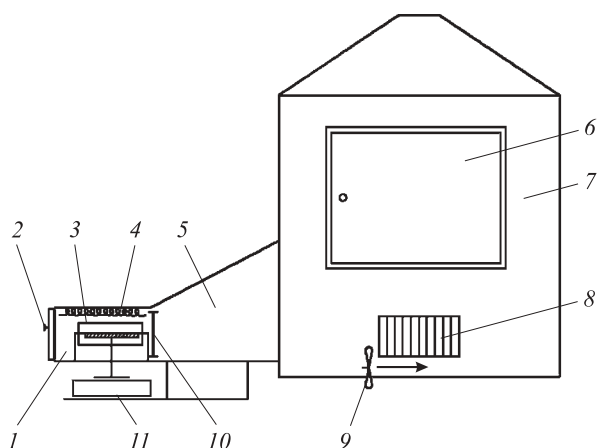
Для ее достижения были проведены экспериментальные исследования процесса горения образцов древесной массы наиболее распространенных лиственных и хвойных пород деревьев Вьетнама.

### 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:

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

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;

$\tau$  — 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:

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

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 кг/(м<sup>2</sup>·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.

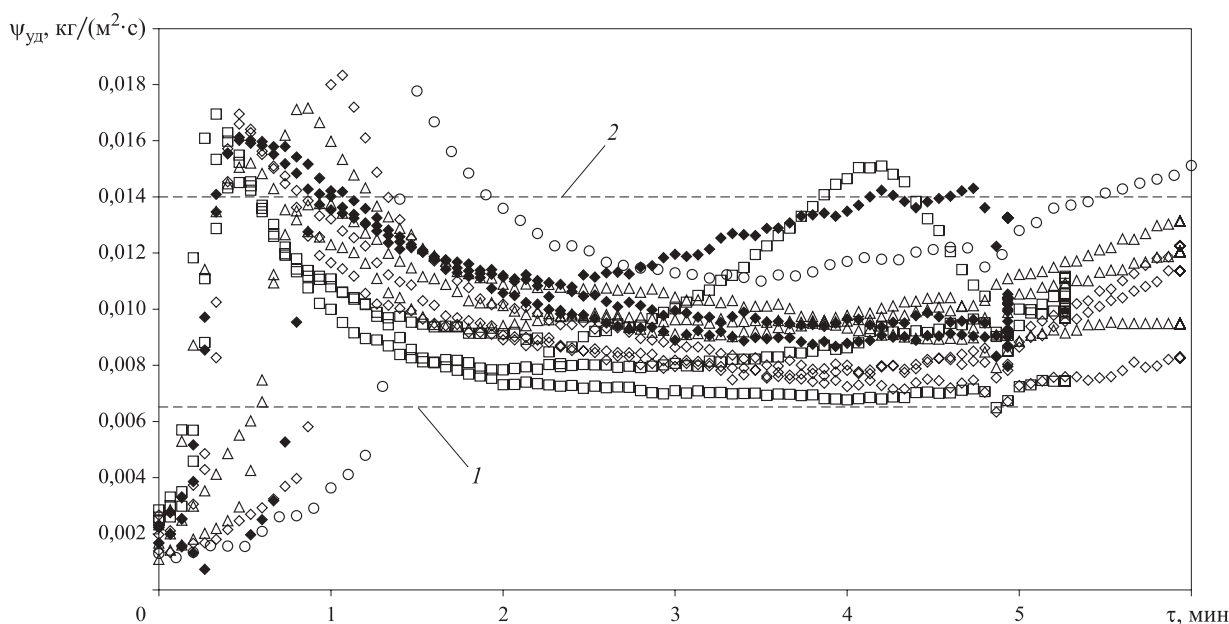
Средние за время проведения экспериментов значения  $\psi_{уд}$  и  $L_{CO}$  представлены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что:

- экспериментальные средние значения  $\psi_{уд}$  находятся в диапазоне от 0,0063 кг/(м<sup>2</sup>·с) для хвойных пород до 0,014 кг/(м<sup>2</sup>·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,  $\psi_{уд} = 0,0063$  кг/(м<sup>2</sup>·с); 2 — лиственные породы,  $\psi_{уд} = 0,014$  кг/(м<sup>2</sup>·с) [21]

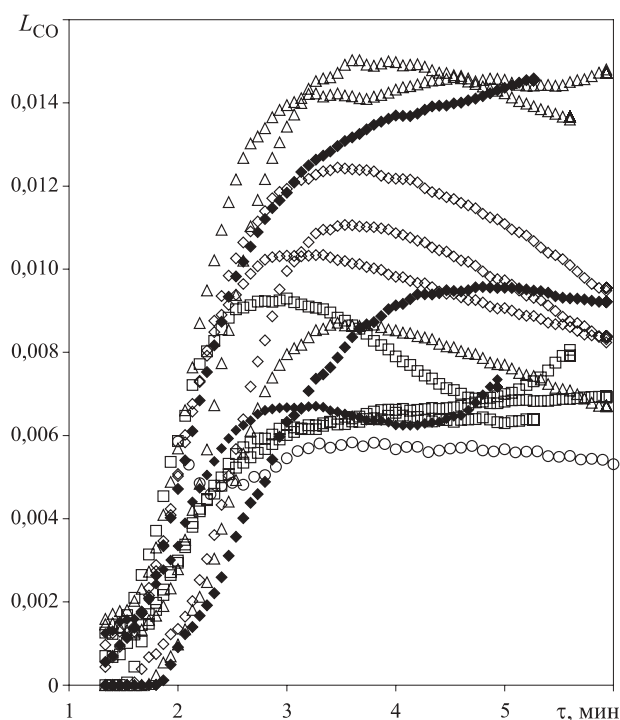


Рис. 3. Зависимость удельного массового коэффициента образования СО от времени испытаний образцов: □ — № 1; Δ — № 2; ◆ — № 3; ○ — № 4; ◇ — № 5

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.