

Д. А. КОРОЛЬЧЕНКО, канд. техн. наук, заведующий кафедрой комплексной безопасности в строительстве Московского государственного строительного университета (Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; e-mail: ICA_kbs@mgsu.ru)

Е. Н. ДЕГАЕВ, аспирант кафедры комплексной безопасности в строительстве Московского государственного строительного университета (Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; e-mail: ICA_kbs@mgsu.ru)

А. Ф. ШАРОВАРНИКОВ, д-р техн. наук, профессор кафедры комплексной безопасности в строительстве Московского государственного строительного университета (Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; e-mail: ICA_kbs@mgsu.ru)

УДК 614.84.664

ГОРЕНИЕ ГЕПТАНА В МОДЕЛЬНОМ РЕЗЕРВУАРЕ

Определены основные параметры модельного резервуара, используемого для определения эффективности пенообразователей при тушении пожаров горючих жидкостей. Выявлена взаимосвязь между основными параметрами, характеризующими тепловой режим горения. Анализ результатов экспериментов показывает справедливость принятых допущений, что величина теплового потока от факела пламени складывается из удвоенных затрат тепла на испарение горючей жидкости в процессе горения.

Ключевые слова: модельный резервуар; эффективность пенообразователей; удельная массовая скорость выгорания.

Скорость испарения жидкости определяется суммой мольного и диффузионного потоков пара. Детальный анализ процесса испарения с открытой поверхности был дан Стефаном [1], поэтому формула, описывающая испарение жидкости с учетом мольных потоков, носит его имя — формула Стефана. С ее помощью можно проанализировать влияние на скорость испарения горючей жидкости (ГЖ) основных параметров, изменяющихся в процессе тушения водой:

- температуры поверхности;
- температуры газовой фазы;
- толщины диффузионного слоя;
- структуры молекул горючего через коэффициент диффузии молекул в паровой фазе;
- концентрации паров жидкости в окружающей среде.

Удельная скорость испарения ГЖ u_m^0 (кг/(м²·с)) определяется по формуле

$$u_m^0 = \frac{D_0}{RT_0} \left(\frac{T_F}{T_0} \right)^m \frac{P_a}{\delta} \ln \frac{P_a - P_1}{P_a - P_s}, \quad (1)$$

где D_0 — коэффициент диффузии молекул ГЖ в газовой фазе при нормальной температуре T_0 , м²/с;
 R — универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);
 T_F — температура газовой фазы, К;
 P_a — атмосферное давление, Па;
 δ — толщина диффузионного слоя, м;
 P_1 — давление пара ГЖ в окружающей среде на расстоянии от поверхности, равном толщине диффузионного слоя δ , Па;

P_s — давление насыщенного пара ГЖ при температуре ее поверхности T_s , Па.

Показатель степени m для углеводородов приблизительно равен двум: $m = 2$.

В соответствии с формулой Стефана [1] скорость выгорания (испарения) будет тем выше, чем больше давление пара жидкости P_s и чем выше температура в газовой фазе [2]. При горении давление пара ГЖ P_1 , как правило, очень мало, поскольку его величина определяется в зоне горения, а толщина диффузионного слоя измеряется от поверхности ГЖ до зоны горения. При ламинарном горении ГЖ в цилиндрических горелках толщина диффузионного слоя равна высоте свободного борта, а при турбулентном горении — фактическому расстоянию до факела пламени [3, 4].

Цель данной работы — определить основные параметры модельного резервуара из стали низкой прочности, с толщиной стенок $(1 \pm 0,5)$ мм, внутренним диаметром (150 ± 5) мм, высотой (200 ± 5) мм, который используется для определения эффективности пенообразователей при тушении пожаров горючих жидкостей по ГОСТ Р 53280.2–2010 “Установки пожаротушения автоматические. Огнетушащие вещества. Часть 2. Пенообразователи для подслоного тушения пожаров нефти и нефтепродуктов в резервуарах. Общие технические требования и методы испытаний”.

Полагая в первом приближении, что скорость выгорания жидкости численно равна скорости ее испарения в условиях пожара [5], можно выявить однозначную взаимосвязь между основными параметрами, характеризующими тепловой режим горения.

В установившемся режиме горения скорость выгорания определяется потоком тепла от факела пламени к поверхности жидкости при коэффициенте Рейнольдса более 2300:

$$u_m^0 = 0,5[\alpha(T_f - T_s)]/Q_r, \quad (2)$$

где T_f — температура факела пламени, К;
 α — коэффициент теплоотдачи, Дж/(с·м²·К);
 Q_r — удельная теплота нагревания и испарения ГЖ, Дж/кг.

Коэффициент теплоотдачи α определяется из эксперимента. Его величина практически постоянна при горении веществ одного гомологического ряда, например при пожарах углеводородов $\alpha \cong (24 \pm 2)$ Дж/(с·м²·К) [1]. При горении метанола и альдегидов, в молекулах которых атомов кислорода не меньше, чем атомов углерода, пламя практически прозрачно, поэтому величина лучистого потока к поверхности горения заметно ниже, чем при горении углеводородов [6]. Для этих систем $\alpha = (18 \pm 1)$ Дж/(с·м²·К) [1].

Формула (2) показывает взаимосвязь основных параметров в процессе горения. Из нее видно, что скорость выгорания будет тем выше, чем больше температура пламени и ниже температура поверхности горения. Введением множителя 0,5 учитывается доля теплового потока, который поступает в горючую жидкость и поднимает ее среднюю температуру.

Таблица 1. Параметры модельного резервуара

Параметр резервуара	Значение параметра
Высота H , м	0,2
Диаметр D , м	0,15
Площадь S , м ²	0,0176
Плотность гептана ρ_r , кг/м ³	684
Удельная теплоемкость C_v , кДж/(кг·К)	1,00
Энтальпия конденсата Q_r , кДж/кг	410

Таблица 2. Результаты измерений

Высота свободного борта от ГЖ H , м	Высота ГЖ в резервуаре H_0 , м	τ , с	Δm , кг	T , °С	T_0 , °С	Разница температур ГЖ до и после тушения Δt , °С	Объем ГЖ в резервуаре V_r , м ³
0,045	0,155	30	0,0063	23,5	21,5	2,0	0,0027
0,045	0,155	60	0,0112	27,6	24,3	3,3	0,0027
0,045	0,155	120	0,0234	33,8	28,6	5,2	0,0027
0,010	0,190	30	0,0063	27,3	25,5	1,8	0,0033
0,010	0,190	60	0,0104	29,8	27,2	2,6	0,0033
0,010	0,190	120	0,0230	33,8	29,4	4,4	0,0033
0,050	0,150	30	—	21,0	18,7	2,3	0,0026
0,050	0,150	60	—	26,0	21,9	4,1	0,0026
0,050	0,150	120	—	32,6	26,4	6,2	0,0026

Величину теплового потока, поступающего в горючую жидкость, можно определить экспериментально, измеряя повышение температуры горючего после прекращения горения, которое можно реализовать, например, накрыв горящую емкость крышкой. Затем жидкость перемешивают и измеряют температуру до и после горения [7]. Величина теплового потока q (кДж/(м²·с)) рассчитывается по формуле

$$q = \frac{C \Delta m (T - T_0)}{S \tau}, \quad (3)$$

где C — удельная теплоемкость, кДж/(кг·К);
 Δm — разность между массами гептана до начала и после окончания горения, кг;
 T — конечная температура, К;
 S — площадь поверхности горения, м²;
 τ — время свободного горения, с.

Удельная массовая скорость выгорания жидкости определяется экспериментально по изменению массы жидкости за определенный промежуток времени. По существу, анализируется процесс испарения горючей жидкости, но по аналогии с горением предварительно перемешанных газовых смесей на диффузионное горение жидкости автоматически переносится адекватность понятий скорости подачи газовой смеси (здесь — испарения) и скорости горения (здесь — выгорания) [8]. Удельная массовая скорость выгорания U (кг/(м²·с)) определяется параллельно с измерениями температуры горючей жидкости и рассчитывается по формуле

$$U = \Delta m / (S \tau). \quad (4)$$

В отличие от кинетического режима горения скорость горения жидкости, а точнее ее паров в смеси с воздухом, отличается от скорости испарения. Если рассматривать процесс горения жидкости с точки зрения выхода конечных продуктов сгорания, то их суммарная масса или объем, выделившийся за единицу времени и приведенный к нормальным условиям, окажется в 90...95 раз больше, чем рас-

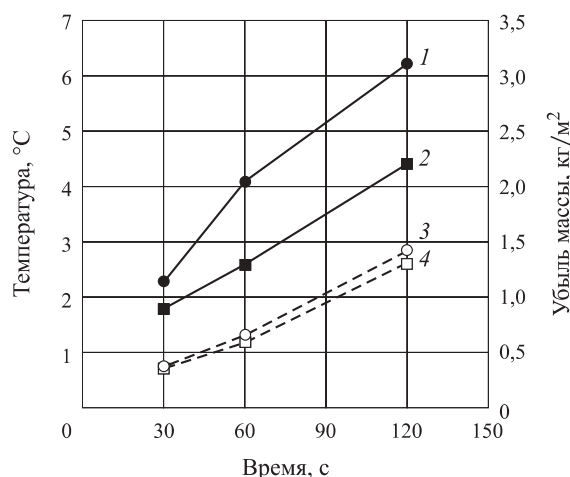


Рис. 1. Зависимость температуры (1, 2) и массы (3, 4) гептана от времени свободного горения при тепловом потоке от факела пламени и H , равном 0,01 м (1, 3) и 0,045 м (2, 4)

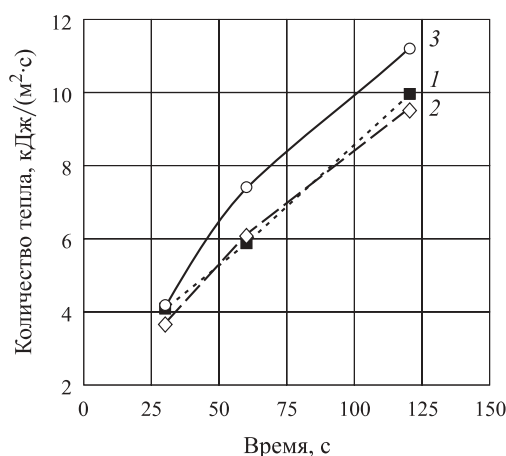


Рис. 2. Зависимость количества тепла, перешедшего через поверхность горения в слой горючей жидкости, от времени горения при H , равном 0,01 м (1), 0,045 м (2) и 0,05 м (3)

ход горючего газа. Этот результат является естественным, поскольку для окисления одного объема горючего газа необходимо 90...95 объемов воздуха.

В экспериментах применялся модельный резервуар с параметрами, приведенными в табл. 1.

Результаты проведенных экспериментов представлены в табл. 2.

Результаты обработки экспериментальных данных приведены на рис. 1–3.

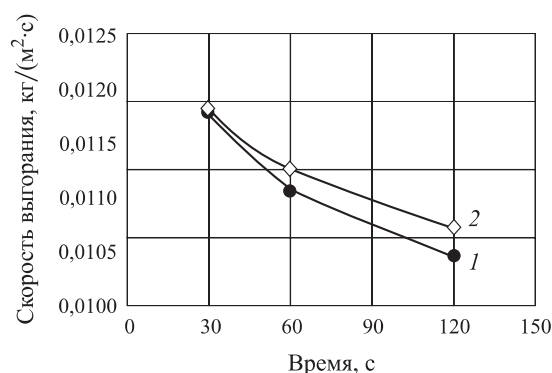


Рис. 3. Зависимость удельной массовой скорости выгорания (испарения) гептана в модельном резервуаре от времени свободного горения при H , равном 0,01 м (1) и 0,045 м (2)

Анализ результатов измерений показывает справедливость допущений, принятых в соответствии с формулой (2), в которой величина теплового потока от факела пламени складывается из удвоенных затрат тепла на испарение горючей жидкости в процессе горения.

Количество тепла, поглощенного горючей жидкостью, постепенно нарастает со временем свободного горения. Так же постепенно увеличивается и убыль массы горючего. Однако темпы нарастания этих параметров непропорциональны отрезкам времени, поэтому удельная скорость выгорания постепенно снижается по мере свободного горения, хотя это снижение и незначительно (в пределах 10 % от среднего значения).

Высота свободного борта влияет на процесс накопления тепловой энергии как дополнительный источник тепла: разогревшись до высокой температуры, он передает тепло по металлическим стенкам к поверхности горячей жидкости. Вклад доли тепла, получаемого ГЖ от свободной стенки, составляет 10–15 % от потока, поступающего непосредственно к поверхности горячей жидкости от факела пламени.

В результате проведенных исследований определены основные параметры, характеризующие модельный резервуар, который используется для определения эффективности пенообразователей при тушении пожаров горючих жидкостей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шароварников А. Ф., Молчанов В. П., Воевода С. С., Шароварников С. А. Тушение пожаров нефти и нефтепродуктов. — М.: Изд. дом "Калан", 2002. — 448 с.
2. Maxwell J. C. The scientific papers. — Cambridge: University Press, 1890. — Vol. II. — С. 639.
3. Блинов В. И., Худяков Г. Н. Диффузионное горение жидкостей. — М.: АН СССР, 1961. — 208 с.
4. Горшков В. И. Тушение пламени горючих жидкостей. — М.: Пожнаука, 2007. — 267 с.
5. Худяков Г. Н. Выгорание жидкостей со свободной поверхности // Известия АН СССР. Отделение технических наук. — 1945. — № 10. — С. 11–15.

6. Сполдинг Д. Б. Горение и массообмен / Пер. с англ. — М. : Машиностроение, 1985. — 240 с.
7. Корольченко Д. А., Шароварников А. Ф., Дегаев Е. Н. Лабораторная методика определения изолирующих свойств пены на поверхности гептана // Пожаровзрывобезопасность. — 2014. — Т. 23, № 4. — С. 72–76.
8. Корольченко Д. А., Шароварников А. Ф. Универсальность механизмов тушения пламени различными огнетушащими веществами // Пожаровзрывобезопасность. — 2014. — Т. 23, № 11. — С. 84–88.

Материал поступил в редакцию 18 декабря 2014 г.

English

COMBUSTION OF HEPTANE IN A MODEL TANK

KOROLCHENKO D. A., Candidate of Technical Sciences, Head of Department of Complex Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; e-mail address: ICA_kbs@mgsu.ru)

DEGAEV E. N., Postgraduate Student of Department of Complex Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; e-mail address: ICA_kbs@mgsu.ru)

SHAROVARNIKOV A. F., Doctor of Technical Sciences, Professor of Department of Complex Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; e-mail address: ICA_kbs@mgsu.ru)

ABSTRACT

Key parameters of a model tank used for determination of efficiency of foam agents during suppression of fire of combustible liquids are determined. The interrelation between key parameters characterizing the thermal mode of burning is revealed. Analysis of experimental results shows the justice of assumptions that the size of a heat flow from a flame torch consists of doubled heat costs for evaporation of combustible liquid while burning.

Keywords: model tank; efficiency of foam agents; mass burnout rate.

REFERENCES

1. Sharovarnikov A. F., Molchanov V. P., Voevoda S. S., Sharovarnikov S. A. *Tusheniye pozharov nefii i nefteproduktov* [Fire extinguishing of oil and oil products]. Moscow, Kalan Publ., 2002. 448 p.
2. Maxwell J. C. *The scientific papers*. Cambridge, University Press, 1890, vol. II, p. 639.
3. Blinov V. I., Khudyakov G. N. *Diffuzionnoye goreniye zhidkostey* [Diffusion burning of liquids]. Moscow, Russian Academy of Sciences Publ., 1961. 208 p.
4. Gorshkov V. I. *Tushenie plameni goryuchikh zhidkostey* [Extinguishing of combustible liquids' flame]. Moscow, Pozhnauka Publ., 2007. 267 p.
5. Khudyakov G. N. Vygoreniye zhidkostey so svobodnoy poverkhnosti [Burn-out of liquids from a free surface]. *Izvestiya AN SSSR. Otdeleniye tekhnicheskikh nauk. — Bulletin of Russian Academy of Sciences. Department of Engineering Sciences*, 1945, no. 10, pp. 11–15.
6. Spalding D. B. *Combustion and mass transfer*. Pergamon Press, Oxford, 1979 (Russ. ed.: Spalding D. B. *Goreniye i massoobmen*. Moscow, Mashinostroeniye Publ., 1985. 240 p.).
7. Korolchenko D. A., Sharovarnikov A. F., Degaev E. N. Laboratornaya metodika opredeleniya izoliruyushchikh svoystv peny na poverkhnosti heptana [Laboratory standard technique for insulating properties of foam on heptane surface]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2014, vol. 23, no. 4, pp. 72–76.
8. Korolchenko D. A., Sharovarnikov A. F. Universalnost mekhanizmov tusheniya plameni razlichnymi ognetushashchimi veshchestvami [Universality of mechanisms of fire suppression by various extinguishing agents]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2014, vol. 23, no. 11, pp. 84–88.