

Испарение жидкого метана с металлической поверхности

© В. А. Горев¹, Д. Л. Овсянников²

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26)

² ООО "Центр пожарной безопасности" (Россия, 141205, Московская область, г. Пушкино, ул. Набережная, 2а, пом. 349)

РЕЗЮМЕ

Введение. При аварийных проливах жидкого метана на грунт в результате его интенсивного кипения возникает взрывоопасная ситуация. При проливе на металлические поверхности кипение происходит в пленочном режиме, при этом скорость кипения значительно превышает скорость кипения на грунте.

Методы. Расчет скорости испарения жидкого метана выполняется в два этапа: на первом — для значений числа Фурье $Fo < 0,5$, когда поверхность можно считать термически толстым телом, на втором — для $Fo \geq 0,5$ вплоть до Fo^* , когда температура холодной поверхности достигает второй критической $T_{кр2} \approx 160,56$ К и заканчивается пленочное кипение.

Результаты. Подтверждено наблюдение, что коэффициент теплопередачи при пленочном кипении слабо зависит от температурного напора и фактически остается постоянным во время всего процесса пленочного кипения. В этом случае при толщине стального листа $\delta \leq 2,5$ мм, что соответствует $Bi \leq 0,1$, его можно считать термически тонким телом. Это обстоятельство подтверждается расчетами при $Fo \geq 0,5$. Определено время пленочного кипения и получена масса жидкости, испарившейся за это время.

Заключение. Предложенный метод расчета испарения жидкого метана с металлической поверхности применим и для других пар *криогенная жидкость – металл*. При этом следует учитывать изменение термической активности металлов ($C_{p\rho\lambda}$) в зависимости от их температуры.

Ключевые слова: пленочное кипение; тепловой поток; криогенная жидкость; тепловая активность; число Био; число Фурье; термически тонкое тело.

Для цитирования: Горев В. А., Овсянников Д. Л. Испарение жидкого метана с металлической поверхности // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2019. — Т. 28, № 1. — С. 14–21. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.01.14-21.

✉ Горев Вячеслав Александрович, e-mail: kafedrapb@yandex.ru

Evaporation of the liquid methane from the metal surface

© V. A. Gorev¹, D. L. Ovsyannikov²

¹ National Research Moscow State University of Civil Engineering (Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation)

² Fire Safety Centre LLC (Naberezhnaya St., 2a, room 349, Moscow Region, Pushkino, 141205, Russian Federation)

ABSTRACT

Introduction. At the emergency passages of a liquid methane on a soil there is its intensive boiling and the explosive situation is formed. At the passage on metal surfaces boiling happens in the film mode and boiling speed considerably exceeds boiling speed on a soil.

Methods. Calculation of rate of evaporation of a liquid methane is broken into two stages: the first stage — to value of numbers $Fo < 0.5$, when the surface can be considered thermally thick body, the second stage — for $Fo \geq 0.5$ in flesh to Fo^* when temperature of a cold surface reaches value of the second critical $T_{cr2} \approx 160.56$ K and comes to an end film boiling.

Results. Observation is confirmed, that the heat transfer coefficient at film boiling poorly depends on a temperature pressure and actually remains to constants during all process of film boiling. In this case at a thickness of a steel sheet $\delta \leq 2.5$ mm, that corresponds to $Bi \leq 0.1$ of a leaf it is possible to consider thermally thin body. This circumstance is exposed calculations for $Fo \geq 0.5$. The dependence of mass of the evaporated liquid during film boiling is received and time of film boiling is defined.

Conclusions. The offered computational method of evaporation of a liquid methane from a metal surface is applicable for other couples *cryogenic liquid – metal*. At the same time it is necessary to consider change of thermal activity of metals ($C_{p\rho\lambda}$) with change of their temperature.

Keywords: film boiling; heat flux; cryogenic liquid; thermal activity; Biot's number; number of Fourier; thermally thin body.

For citation: V. A. Gorev, D. L. Ovsyannikov. Evaporation of the liquid methane from the metal surface. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2019, vol. 28, no. 1, pp. 14–21 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2019.28.01.14-21.

✉ Vyacheslav Aleksandrovich Gorev, e-mail: kafedrapb@yandex.ru

Введение

В условиях, когда объемы производства сжиженного природного газа (СПГ) растут, обеспечение пожаровзрывобезопасности при его производстве, хранении и транспортировке является актуальной задачей. Формирование взрывоопасной ситуации начинается с неконтролируемого истечения СПГ с последующим испарением и смешением паров с окружающим воздухом. Скорость испарения определяется режимом теплообмена между СПГ и подстилающей поверхностью и между СПГ и окружающим воздухом. Теплообмен между СПГ и подстилающей поверхностью определяется режимом кипения, который зависит от температурного напора между средами [1–6]. Теплообмен между СПГ и окружающим воздухом определяется состоянием воздушной среды, температурой воздуха и скоростью ветра, а также размером очага испарения [7–10].

В регламентирующих документах [10, 11] интенсивность испарения СПГ \dot{m} (кг/(м²·с)) при его проливе описывается соотношением

$$\dot{m} = \frac{T_0 - T_k}{r} \left(\frac{\lambda \rho C}{\pi t} \right)^{0,5}, \quad (1)$$

где T_0 , T_k — начальная температура подстилающей поверхности и температура кипения СПГ, К;

r — теплота испарения СПГ, Дж/кг;

$\lambda \rho C$ — тепловая активность материала подстилающей поверхности;

λ — коэффициент теплопроводности материала подстилающей поверхности, Вт/(м·К);

ρ — плотность материала, в нашем случае металла, кг/м³;

C — удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·К).

Выражение (1) получено в предположении, что подстилающая поверхность простирается в глубину на бесконечность, а характерное время изменения температуры подстилающей поверхности на границе контакта намного (по крайней мере, в 8 раз) меньше времени, когда можно использовать выражение (1) [1, 6].

Для металлических поверхностей ни одно из этих предположений не выполняется, поэтому использование выражения (1) для определения скорости испарения в этом случае недопустимо.

Вместе с тем при транспортировке и производстве СПГ его контакт с металлическими поверхностями неизбежен как при случайных проливах, так и при технологических операциях [12].

Целью настоящей работы является изучение скорости испарения СПГ с поверхности металла в режиме пленочного кипения в зависимости от толщины металлической конструкции. Теплофизические

свойства СПГ принимаются как для жидкого метана, а свойства металла — как для мягкой стали: $C = 460$ Дж/(кг·К), $\lambda = 53$ Вт/(м·К), $\rho = 7800$ кг/м³ [13].

Методы исследования

Сжиженный метан хранится при температуре кипения 111,66 К, и при попадании на металлическую поверхность с температурой, которая выше предельной температуры перегрева жидкого метана $T_{п.п} = 166$ К, реализуется пленочный режим кипения [2, 3, 14–16]. Режим пленочного кипения сменяется переходным режимом [2, 3, 14, 16] при второй критической температуре кипения $T_{кр2}$. Эту температуру можно оценить из условия [2, 17–20]:

$$\Delta T_{кр2} = T_{кр2} - T_k = C(T_{п.п} - T_k), \quad (2)$$

где $C = 0,8 \div 1,0$; в дальнейшем принимаем $C = 0,9$ и в результате получаем: $\Delta T_{кр2} = 48,9$ К, а $T_{кр2} = 160,56$ К.

Тепловой поток от подстилающей поверхности при температуре поверхности, соответствующей $T_{кр2}$, называется вторым критическим потоком $q_{кр2}$ (Вт/м²) и определяется по соотношению [16, 21–23]:

$$q_{кр2} = 0,091 r_3 \rho_V \sqrt[4]{\frac{g(\rho_L - \rho_V) \sigma}{(\rho_L + \rho_V)^2}}, \quad (3)$$

где r_3 — эффективная теплота парообразования с учетом нагревания пара от температуры кипения T_k до средней температуры пара T_V ;

ρ_V — плотность пара при температуре, средней между температурой поверхности $T_{кр2} = 160,50$ К и температурой кипения $T_k = 111,66$ К, кг/м³;

$$T_V = \frac{T_k + T_{кр2}}{2} = \frac{111,66 + 160,56}{2} = 136,11 \text{ К};$$

g — ускорение свободного падения, м/с²; $g = 9,81$ м/с²;

ρ_L — плотность жидкости при температуре кипения, кг/м³; $\rho_L = 426$ кг/м³;

σ — поверхностное натяжение жидкого метана при $T_k = 111,66$ К, Н/м; $\sigma = 14 \cdot 10^{-3}$ Н/м.

Подставив соответствующие значения в (3), получим:

$$q_{кр2} = 0,091 \cdot 562,83 \cdot 10^3 \cdot 1,44 \times \sqrt[4]{\frac{9,81 \cdot 14 \cdot 10^{-3} (426 - 1,44)}{(426 + 1,44)^2}} = 9858 \text{ Вт/м}^2.$$

Исходя из определения коэффициента теплоотдачи, его можно оценить при условии второго кризиса кипения:

$$\alpha_{кр2} = q_{кр2} / \Delta T_{кр2} = 9858 / 48,9 = 201,5 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

В литературе по пленочному кипению отмечается сравнительно постоянное значение коэффици-

ента теплоотдачи при изменении температурного напора, если он не настолько большой, что необходимо учитывать излучение от поверхности. При рассматриваемых низких температурах вопрос об излучении отпадает. Коэффициент теплоотдачи при пленочном кипении $\alpha_{пл}$ на горизонтальных поверхностях рассчитывается по выражению [2]:

$$\alpha_{пл} = 0,25 \sqrt[3]{\frac{\lambda_V^2 C_{pV} g (\rho_L - \rho_V)}{\nu_V}}, \quad (4)$$

где λ_V — коэффициент теплопроводности пара при его температуре \bar{T}_V ;

C_{pV} — теплоемкость пара, Дж/(кг·К);

ν_V — коэффициент кинематической вязкости при \bar{T}_V .

Для случая второго кризиса кипения, когда $\bar{T}_V = 136,11$ К, независимое определение коэффициента теплоотдачи дает следующее значение:

$$\alpha_{пл.кр2} = 0,25 \sqrt[3]{\frac{0,015^2 \cdot 9,81 \cdot (426 - 1,44) \cdot 2,12 \cdot 10^3}{3,78 \cdot 10^{-6}}} = 201,75 \text{ Вт/(м}^2\text{·К)}.$$

Подобное вычисление при начальном температурном напоре $\Delta T_0 = T_0 - T_k = 293 - 111,66 = 181,34$ К, когда начальная температура поверхности $T_0 = 293$ К, а средняя температура пара $\bar{T}_V = (293 + 111,66)/2 = 202,33$ К, дает значение $\alpha_{0пл} = 199,5$ Вт/(м²·К). В дальнейшем принимаем $\alpha_{пл} = 200$ Вт/(м²·К) для всего диапазона изменения температурного напора при пленочном кипении.

Металлы обладают высокой термической активностью, поэтому температура охлаждаемой поверх-

ности меняется медленно по сравнению с временем изменения температуры поверхности грунта:

$$t_3 = \frac{\lambda \rho C}{\alpha_{пл}^2} = \frac{0,9 \cdot 1200 \cdot 830}{200^2} = 22,4 \text{ с.}$$

Для ранее выбранных параметров мягкой стали λ , ρ и C характерное время изменения температуры охлаждаемой поверхности составляет [6]:

$$t_3 = (53 \cdot 7800 \cdot 460)/200^2 = 4754,1 \text{ с.}$$

Охлаждение поверхности металла происходит медленнее по сравнению с грунтом в 212 раз, поэтому и температурный напор при кипении на металлической поверхности будет уменьшаться медленнее, а кипение, наоборот, будет интенсивнее.

Из анализа теплообмена на плоских поверхностях [1, 6] установлено, что выражение (1) дает приемлемые результаты при $t \geq t_3$. Это значит, что при проливе на глину выражение (1) будет справедливо уже через 3 мин, а для металлических поверхностей — через 10,5 ч.

Выражение (1) неприемлемо для металлических поверхностей конечной толщины, поскольку другое условие применимости выражения (1) $Fo < 0,5$ быстро нарушается.

Далее рассматривается теплообмен при пленочном кипении жидкого метана на металлических поверхностях толщиной $\delta = 0,100; 0,050; 0,025; 0,010; 0,003$ м.

Тыльная сторона поверхности теплоизолирована. В табл. 1 сведены основные параметры, которые необходимы для расчета теплового режима при кипении жидкого метана на поверхности малоуглеродистой стали.

Таблица 1. Исходные данные для расчета температуры поверхности металла

Table 1. Input data for calculation of surface temperature of metal

Параметр Parameter	Значение параметра при δ , м / Value of the parameter at δ , m				
	0,100	0,050	0,025	0,010	0,003
Bi	0,3774	0,1887	0,0943	0,03774	0,01132
μ^2	0,33	0,1768	0,09134	0,03726	0,001128
$t_{0,5}$, с / $t_{0,5}$, sec	338,5	84,62	21,16	3,385	0,3
$t_{0,5}/t_3$	0,0718	0,0178	0,00445	0,000718	$6,31 \cdot 10^{-5}$
$\sqrt{t_{0,5}/t_3}$	0,2668	0,1334	0,0667	0,00667	$7,94 \cdot 10^{-3}$
t_2 , с / t_2 , sec	1794	897	448,5	179,4	53,82

Примечание. Bi — число Био, $Bi = \alpha_{пл} \delta / \lambda$; $\mu^2 = Bi (1 - Bi/3)$ при $Bi < 1,2$ [6]; $t_{0,5}$ — время, при котором $Fo = \frac{\lambda}{C_p \rho} \frac{t}{\delta^2} = 0,5$, т. е. плоскую конструкцию при $Fo < 0,5$ можно считать термически толстым телом [5, 6]; $t_{0,5} = 0,5 (\delta^2 C_p \rho / \lambda)$; t_2 — характерное время охлаждения конструкции, т. е. характерное время изменения ее средней температуры; $t_2 = C_p \rho \delta / \alpha$.

Note. Bi — number Bio, $Bi = \alpha_{melt} \delta / \lambda$; $\mu^2 = Bi (1 - Bi/3)$ at $Bi < 1,2$ [6]; $t_{0,5}$ — time, at which $Fo = \frac{\lambda}{C_p \rho} \frac{t}{\delta^2} = 0,5$, that is flat design at $Fo < 0,5$ it is possible to consider thermally thick body [5, 6]; $t_{0,5} = 0,5 (\delta^2 C_p \rho / \lambda)$; t_2 — characteristic cooling-off period of a design, that is characteristic time of change of its average temperature; $t_2 = C_p \rho \delta / \alpha$.

Из результатов [6] следует, что температура охлаждаемой поверхности $T_{\text{п}}$ определяется по выражениям:

- при $t < t_{0,5}$ и одновременно при $t/t_3 < 0,5$:

$$\frac{T'_{\text{п}} - T_{\text{к}}}{T_0 - T_{\text{к}}} = 1 - \frac{\frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{t}{t_3}}}{1 + \frac{\sqrt{\pi}}{2} \sqrt{\frac{t}{t_3}}}; \quad (5)$$

- при $t \geq t_{0,5}$, т. е. при $Fo \geq 0,5$:

$$\frac{T''_{\text{п}} - T_{\text{к}}}{T_0 - T_{\text{к}}} = \left(\frac{1 - \frac{2}{3} Bi + \frac{16}{45} Bi^2}{1 - \frac{1}{3} Bi + \frac{8}{45} Bi^2} \right) e^{-\mu^2 Fo}, \quad (6)$$

где $T'_{\text{п}}$ — температура охлаждаемой поверхности к моменту $Fo = 0,5$;

$T''_{\text{п}}$ — температура охлаждаемой поверхности при $Fo \geq 0,5$.

В дальнейшем примем обозначение:

$$\frac{1 - \frac{2}{3} Bi + \frac{16}{45} Bi^2}{1 - \frac{1}{3} Bi + \frac{8}{45} Bi^2} = f(Bi).$$

Температура на тыльной стороне поверхности $T_{\text{т}}$ (К) определится из формулы

$$\frac{T_{\text{т}} - T_{\text{к}}}{T_0 - T_{\text{к}}} = \left(\frac{1 - \frac{1}{6} Bi + \frac{23}{360} Bi^2}{1 - \frac{1}{3} Bi + \frac{8}{45} Bi^2} \right) e^{-\mu^2 Fo}. \quad (7)$$

Тепловой поток от металлической поверхности к кипящей жидкости $q_{\text{пл}}$ (Вт/м²) определяется выражением

$$q_{\text{пл}} = \alpha_{\text{пл}} (T_{\text{п}} - T_{\text{к}}).$$

При $Fo < 0,5$ это выражение принимает вид:

$$q'_{\text{пл}} = \alpha_{\text{пл}} (T_0 - T_{\text{к}}) \left[1 - \frac{\frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{t}{t_3}}}{1 + \frac{\sqrt{\pi}}{2} \sqrt{\frac{t}{t_3}}} \right]. \quad (8)$$

Общее количество тепла q'_{Σ} (МДж/м²), перешедшее от металлической поверхности к кипящей жидкости за период времени $0 - t_{0,5}$, определяется выражением

$$q'_{\Sigma} = \alpha_{\text{пл}} (T_0 - T_{\text{к}}) \int_0^{t_{0,5}} \left[1 - \frac{\frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{t}{t_3}}}{1 + \frac{\sqrt{\pi}}{2} \sqrt{\frac{t}{t_3}}} \right] dt. \quad (9)$$

После интегрирования получаем:

$$q'_{\Sigma} = \Delta H_{\Sigma} \left[\frac{\pi - 4}{2\pi} Bi + \frac{16}{\pi\sqrt{2\pi}} - \frac{32}{Bi\pi^2} \ln \left(1 + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{2}} Bi \right) \right], \quad (9')$$

где ΔH_{Σ} — избыточная тепловая энтальпия металлической подстилающей поверхности; $\Delta H_{\Sigma} = C_p \rho \delta (T_0 - T_{\text{к}})$.

Выражение в квадратных скобках в (9) есть доля от общей избыточной энтальпии, которая расходуется на кипение за период времени от $t = 0$ до $t = \frac{1}{2} \frac{\delta^2 C_p \rho}{\lambda} (Fo = 0,5)$. Для интервала времени, ко-

торый соответствует условию $Fo \geq 0,5$, но меньше времени окончания пленочного режима кипения, удельный тепловой поток $q''_{\text{пл}}$ (МДж/м²) будет определяться выражением

$$q''_{\text{пл}} = \alpha_{\text{пл}} (T_0 - T_{\text{к}}) \times \left(\frac{1 - \frac{2}{3} Bi + \frac{16}{45} Bi^2}{1 - \frac{1}{3} Bi + \frac{8}{45} Bi^2} \right) e^{-Fo \left[Bi \left(1 - \frac{1}{3} Bi \right) \right]}. \quad (10)$$

Общее количество энергии (тепла) q''_{Σ} (МДж/м²), поступившее от поверхности к кипящей жидкости за интервал времени между $Fo = 0,5$ и числом Fo^* , соответствующим окончанию пленочного кипения, вычисляется по выражению

$$q''_{\Sigma} = \frac{\Delta H_{\Sigma} f(Bi)}{1 - \frac{1}{3} Bi} \left(e^{-\frac{\mu^2}{2}} - e^{-\mu^2 Fo^*} \right). \quad (11)$$

Число Фурье Fo^* , соответствующее окончанию пленочного кипения, определяется из (6) при $T''_{\text{п}} = T_{\text{кр}2}$:

$$Fo^* = - \frac{\ln f(Bi) \frac{\Delta T_{\text{кр}2}}{T_0 - T_{\text{к}}}}{\mu^2}. \quad (12)$$

Металлические конструкции часто удовлетворяют условиям термически тонкого тела, когда $Bi < 0,1$. В рассматриваемых примерах образцы с $\delta = 0,025$; $0,010$; $0,003$ м как раз и можно рассматривать в качестве таких. Для термически тонких тел температура T по толщине одинакова и определяется выражением [5, 6]:

$$\frac{T - T_{\text{к}}}{T_0 - T_{\text{к}}} = e^{-\bar{t}}, \quad (13)$$

где \bar{t} — безразмерное время; $\bar{t} = \frac{t}{t_2}$ (см. табл. 1).

Таблица 2. Температура поверхности металла и тепловые потоки из него в моменты времени $t_{0,5}$ и t^* , соответствующие Fo^*
Table 2. Surface temperature of metal and heat fluxes from it in instants of $t_{0,5}$ and t^* the corresponding Fo^*

Параметр Parameter	Значение параметра при δ , м / Value of the parameter at δ , m				
	0,100	0,050	0,025	0,010	0,003
ΔH_{Σ} , МДж/м ² / ΔH_{Σ} , MJ/m ²	65,065	32,53	16,266	6,5065	1,952
Fo^*	3,615	7,06	14,014	34,4	115,9
T'_n , К	248,64	268,52	280,1	289,99	292
T''_n , К	248,24	266,89	279,61	287,49	292
T , К	261,82	276,7	284,64	289,61	292
T_r , К	273,4	281,6	287,6	290,12	292
$T_{кр2}$, К ¹⁾	160,56 / 158,01	160,56 / 159,52	160,56 / 160,00	160,56 / 161,16	160,49
$T_{т2}$, К	169,91	164,94	162,86	161,49	110,49
q'_{Σ} , МДж/м ² / q'_{Σ} , MJ/m ²	10,2	2,78	0,73	0,12	0,011
q''_{Σ} , МДж/м ² / q''_{Σ} , MJ/m ²	36,04	20,4	11,375	4,64	1,4
$q_{0,5}$, Вт/м ² / $q_{0,5}$, W/m ²	27316	31200	33686	35153	36070
$q_{\lambda}/\delta^{0,5}$, Вт/м ² / $q_{\lambda}/\delta^{0,5}$, W/m ²	13338,5	15593	16938	14273	—
$q_{пл}$, Вт/м ² / $q_{пл}$, W/m ²	9858	9858	9858	9858	9766
$q_{\lambda}/\delta_{пл}$, Вт/м ² / $q_{\lambda}/\delta_{пл}$, W/m ²	4955,5	4645,6	4876	4905	—

¹⁾ Над чертой приведены значения, определенные по (2), под чертой — по (13), т.е. для термически тонкого тела.
¹⁾ Over line the values, defined on (2), below the line — on (13), that is for thermally thin body are given.

Обсуждение результатов исследований

В табл. 2 сведены результаты вычислений основных величин, характеризующих теплообмен при кипении криогенных жидкостей на металлической поверхности. Примеры приведены для пары *жидкий метан – низкоуглеродистая сталь*.

В табл. 1 приняты следующие обозначения: $\Delta H_{\Sigma} = C_p r \delta (T_0 - T_k)$ — избыточная энтальпия плоской пластины; Fo^* — число Фурье, при котором заканчивается пленочное кипение (см. (12)); T'_n — температура охлаждаемой поверхности к моменту $Fo = 0,5$ (см. (5)); T''_n — температура охлаждаемой поверхности при $Fo \geq 0,5$, определяется по (6); T_r — температура неохлаждаемой поверхности при $Fo = 0,5$ (см. (7)); T — температура пластины в предположении, что она является термически тонким телом (13); $T_{кр2}$ — температура охлаждаемой поверхности, соответствующая моменту окончания пленочного кипения при Fo^* (см. (2)); $T_{т2}$ — температура на тыльной стороне пластины при Fo^* , соответствующем окончанию пленочного кипения (см. (7)); $q_{0,5}$ — тепловой поток из пластины, Вт/м², в момент $t = t_{0,5}$ при $Fo = 0,5$; $q'_{пл}$ — тепловой поток от подстилающей поверхности к кипящей жидкости; $q'_{пл} = q_{кр2}$ (см. (3) и (8)); q'_{Σ} — общее количество энергии, перешедшей из пластины в зону кипения за период времени от $t = 0$ до $t_{0,5}$, соответствующего условию $Fo = \lambda t / (C_p r \delta^2) = 0,5$ (см. (9')); q''_{Σ} — общее количе-

ство энергии, перешедшей из пластины в зону кипения за время изменения числа Фурье от $Fo = 0,5$ до Fo^* (см. (11)); $q_{\lambda}/\delta^{0,5}$, $q_{\lambda}/\delta_{пл}$ — осредненные тепловые потоки, $q_{\lambda}/\delta^{0,5} = \lambda/\delta (T'_n - T_k)$; $q_{\lambda}/\delta_{пл} = \lambda/\delta (T_{кр2} - T_k)$. Сравнение их с тепловыми потоками из пластины соответственно $q_{0,5}$ и $q'_{кр2}$ показывает, что их величина $q_{\lambda}/\delta^{0,5}$, $q_{\lambda}/\delta_{пл}$ составляет примерно половину полного потока для пластины толщиной 0,025; 0,050 и 0,100 м как при $Fo = 0,5$, так и при Fo^* . Для пластины толщиной $\delta = 0,01$ м $q_{\lambda}/\delta^{0,5} < 0,4 q_{0,5}$, а при $Fo^* q_{\lambda}/\delta_{пл} \approx 0,5 q'_{пл}$. Совпадение значений температуры охлаждаемой поверхности, вычисленных для времени $Fo = 0,5$ по соотношениям (5) и (6), справедливым для случаев соответственно $Fo < 0,5$ и $Fo \geq 0,5$, указывает на справедливость допущений, сделанных относительно изменения правила вычисления этой температуры при $Fo = 0,5$.

Выражение для полного количества энергии, перешедшей из пластины в зону кипения к моменту времени $t < t_{0,5}$, записывается в виде:

$$q_{\Sigma t < 0,5} = \frac{H_{\Sigma \delta}}{Bi} \left[\frac{\pi - 4}{\pi} \frac{t}{t_3} + \frac{16}{\pi^{1,5}} \sqrt{\frac{t}{t_3}} - \frac{32}{\pi^2} \ln \left(1 + \frac{\sqrt{\pi}}{2} \sqrt{\frac{t}{t_3}} \right) \right]. \quad (14)$$

В момент $t = t_{0,5}$ выражение (14) совпадает с формулой (9).

Таблица 3. Масса метана испарившегося за время t , кг/м²**Table 3.** The mass of the methane which evaporated during t , kg/m²

δ , м δ , m	Масса метана, кг, испарившегося с 1 м ² поверхности к моменту t , с The mass of the methane, kg, which evaporated from 1 м ² during t , sec									
	0,3	3,385	21,18	69,54	84,65	232,9	338,5	593,1	1194,8	2447,3
0,100	0,0196	0,73	3,168	—	4,96	—	18,16 ⁰	—	—	82,3*
0,050	0,0196	0,73	3,168	—	4,96 ⁰	—	—	—	41,26*	—
0,025	0,0196	0,73	3,168 ⁰	—	—	—	—	23,4*	—	—
0,010	0,0196	0,73 ⁰	—	—	—	9,8*	—	—	—	—
0,003	0,0196 ⁰	—	—	2,51	—	—	—	-118,8	—	—
∞ мет / ∞ metal	2,67	8,98	22,46	40,7	—	74,4	—	11,93	173,66	248,54
∞ бетон / ∞ concrete	0,27	0,9	2,25	4,1	—	7,48	—	—	17,8	25,47

Пр и м е ч а н и я . 1. Знаком “0” отмечено значение массы в момент времени, соответствующий $Fo = 0,5$, знаком “*” — времени окончания пленочного кипения. 2. ∞ мет — “очень большая” толщина металла; ∞ бетон — “очень большая” толщина бетона.

Notes . 1. The “0” badge noted value of weight in the instant corresponding to $Fo = 0.5$, the “*” badge — time of the end of film boiling. 2. ∞ metal — “very big” thickness of metal; ∞ concrete — “very big” thickness of concrete.

При определении количества тепловой энергии, перешедшей из металла в зону кипения в любой момент времени в интервале $t_{0,5} < t < t^*$, необходимо вместо Fo^* , соответствующего времени t^* и концу пленочного кипения, подставить текущее значение $Fo = \lambda t / (C_p \rho \delta^2)$.

Масса метана, испарившегося к моменту времени t , определяется количеством тепла, перешедшего к этому моменту в зону кипения, и количеством тепла, которое уходит на испарение 1 кг метана. Последний параметр зависит от эффективной теплоты испарения $r_{эф}$ (кДж/кг) и учитывает то обстоятельство, что пар покидает зону кипения с температурой выше температуры насыщения. Поскольку температура поверхности меняется от $T_0 = 293$ К до $T_{кр2} = 160,56$ К, температура пара изменяется. Если ориентироваться на температуру поверхности $T_{п} = 160,56$ К и принять, что температура пара равна средней $(T_{п} + T_{к})/2$, а перегрев — $(T_{п} - T_{к})/2$, то

$$r_{эф} = r + \frac{T_{п} - T_{к}}{2} C_{pV} =$$

$$= 510 + \frac{160,56 - 111,66}{2} \cdot 2,12 = 561,8 \text{ кДж/кг},$$

где $r = 510$ кДж/кг; $C_{pV} = 2,12$ кДж/кг [4, 13].

В табл. 3 представлены значения массы метана, испарившегося к моменту времени t , в зависимости от толщины металлической подстилающей поверх-

ности и от теплофизических характеристик подстилающей поверхности.

Из табл. 3 можно заключить, что за время пленочного кипения расходуется ≈ 75 % теплового ресурса конструкции на испарение метана. В дальнейшем при смене режима кипения тепловой поток будет значительно возрастать, несмотря на снижение теплового напора. Оставшиеся 25 % испарятся значительно быстрее. Этот вопрос будет рассмотрен в будущем.

Заключение

В заключение необходимо отметить, что соотношения, предлагаемые для определения скорости испарения криогенных жидкостей [10, 11], неприменимы для расчета скорости испарения с поверхности металла. Приведенный в работе подход можно использовать для вычисления как скорости испарения других криогенных жидкостей (таких как водород, этан и др.), так и скорости захлаживания металлических емкостей, например, азотом перед их заполнением горючими жидкостями или более дорогими газами (H_2 , H_L). Необходимо иметь в виду, что при более глубоком охлаждении и при рассмотрении других металлических поверхностей может возникнуть необходимость учитывать изменение их теплофизических характеристик с понижением температуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лыков А. В. Теория теплопроводности : учеб. пособие. — М. : Высшая школа, 1967. — 599 с.
2. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. — 2-е изд. — М. : Энергия, 1977. — 344 с.
3. Кутателадзе С. С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление. — М. : Энергоатомиздат, 1990. — 367 с.

4. Кутателадзе С. С., Боришанский В. Н. Справочник по теплопередаче. — М.—Л. : Госэнергоиздат, 1958. — 414 с.
5. Rockett J. A., Milke J. A. Conduction of heat of solids // SFPE handbook of fire protection engineering. — 3rd ed. — Quincy, Massachusetts : National Fire Protection Association, 2002. — P. 1–27.
6. Горев В. А., Фомина М. В. Упрощенный расчет теплообмена на плоских поверхностях // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2016. — Т. 25, № 3. — С. 5–14. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.03.5-14.
7. Тепло- и массообмен в процессах испарения : сб. статей Акад. наук СССР / Отв. ред. А. В. Лыков. — М. : Изд-во Акад. наук СССР, 1958. — 255 с.
8. Wong H., Rumschitzki D., Maldarelli C. On the surfactant mass balance at a deforming fluid interface // Physics of Fluids. — 1996. — Vol. 8, No. 11. — P. 3203–3204. DOI: 10.1063/1.869098.
9. Герасимов Д. Н., Юрин Е. И. Плотности потоков массы и энергии на поверхности испаряющейся жидкости // Теплофизика высоких температур. — 2018. — Vol. 56, No. 3. — P. 372–380. DOI: 10.7868/S0040364418030079.
10. Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах : утв. приказом МЧС России от 10.07.2009 № 404 (с изм. на 14.12.2010). URL: <http://docs.cntd.ru/document/902170886> (дата обращения: 20.12.2018).
11. СП 12.13130.2009. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности (с изм. № 1). — Введ. 01.05.2009. — М. : ВНИИПО МЧС России, 2009. — 28 с. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200071156> (дата обращения: 20.12.2018).
12. Ingason H., Li Y. Z. Spilled liquid fires in tunnels // Fire Safety Journal. — 2017. — Vol. 91. — P. 399–406. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.03.065.
13. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. — 2-е изд., доп. и перераб. — М. : Наука, 1972. — 720 с.
14. Солодов А. П. Электронный курс. Гл. 18. Теплообмен при кипении. URL: <http://docplayer.ru/45457268-18-teploobmen-pri-kipenii.html> (дата обращения: 10.12.2018).
15. Мартынов Г. А. Флуктуационная теория жидкостей // Теплофизика высоких температур. — 2018. — Т. 56, № 3. — С. 353–364. DOI: 10.7868/S0040364418030055.
16. Аметистов Е. В., Клименко В. В., Павлов Ю. М. Кипение криогенных жидкостей. — М. : Энергоатомиздат, 1995. — 400 с.
17. Байдаков В. Г. Достижимый перегрев ожиженных газов и их растворов // Физика низких температур. — 2013. — Т. 39, № 8. — С. 835–862.
18. Plachta D. W., Johnson W. L., Feller J. R. Zero boil-off system testing // Cryogenics. — 2016. — Vol. 74. — P. 88–94. DOI: 10.1016/j.cryogenics.2015.10.009.
19. Bellur K., Médiçi E. F., Kulshreshtha M., Konduru V., Tyrewala D., Tamilarasan A., McQuillen J., Leão J. B., Hussey D. S., Jacobson D. L., Scherschligt J., Hermanson J. C., Choi C. K., Allen J. S. A new experiment for investigating evaporation and condensation of cryogenic propellants // Cryogenics. — 2016. — Vol. 74. — P. 131–137. DOI: 10.1016/j.cryogenics.2015.10.016.
20. Notardonato W. U., Swanger A. M., Fesmire J. E., Jumper K. M., Johnson W. L., Tomsik T. M. Final test results for the ground operations demonstration unit for liquid hydrogen // Cryogenics. — 2017. — Vol. 88. — P. 147–155. DOI: 10.1016/j.cryogenics.2017.10.008.
21. Holman J. P. Heat transfer. — 10th ed. — New York : McGraw-Hill, 2009. — 758 p.
22. Vandebroek L., Berghmans J. Safety aspects of the use of LNG for marine propulsion // Procedia Engineering. — 2012. — Vol. 45. — P. 21–26. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.08.114.
23. Ajaev V. S. Interfacial fluid mechanics: A mathematical modeling approach. — Boston, MA : Springer, 2012. — 217 p. DOI: 10.1007/978-1-4614-1341-7.

REFERENCES

1. A. V. Lykov. *Teoriya teploprovodnosti* [Theory of thermal conductivity]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1967. 599 p. (in Russian).
2. M. A. Mikheev, I. M. Mikheeva. *Osnovy teploperedachi* [Heat transfer bases]. 2nd ed. Moscow, Energiya Publ., 1977. 343 p. (in Russian).
3. S. S. Kutateladze. *Teploperedacha i gidrodinamicheskoye soprotivleniye* [Heat transfer and hydrodynamic drag force]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990. 367 p. (in Russian).
4. S. S. Kutateladze, V. N. Borishanskiy. *Spravochnik po teploperedache* [Handbook of heat transfer]. Moscow–Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1958. 414 p. (in Russian).
5. J. A. Rockett, J. A. Milke. Conduction of heat of solids. In: *SFPE handbook of fire protection engineering*. 3rd ed. Quincy, Massachusetts, National Fire Protection Association, 2002, pp. 1–27.

6. V. A. Gorev, M. V. Fomina. Simplified calculation of heat on a flat surface. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2016, vol. 25, no. 3, pp. 5–14 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2016.25.03.5-14.
7. A. V. Lykov (editor-in-chief). *Teplo- i massoobmen v protsessakh ispareniya. Sbornik statey Akademii nauk SSSR* [Warm and mass transfer in evaporation processes. Collected articles of Russian Academy of Sciences]. Moscow, Russian Academy of Sciences Publ., 1958. 255 p. (in Russian).
8. H. Wong, D. Rumschitzki, C. Maldarelli. On the surfactant mass balance at a deforming fluid interface // *Physics of Fluids*. — 1996. — Vol. 8, No. 11. — P. 3203–3204. DOI: 10.1063/1.869098.
9. D. N. Gerasimov, E. I. Yurin. Mass and energy flux rates on the surface of an evaporating liquid. *High Temperature*, 2018, vol. 56, no. 3, pp. 358–365. DOI: 10.1134/S0018151X18030082.
10. *Technique of determination of settlement sizes of fire risk on production objects*. Approved of order of Emercom of Russia on July 10, 2009 No. 404 (ed. on December 14, 2010) (in Russian). Available at: <http://docs.cntd.ru/document/902170886> (Accessed December 20, 2018).
11. Set of rules 12.13130.2009. *Determination of categories of rooms, buildings and external installations on explosion and fire hazard* (with changes no. 1). Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia Publ., 2009. 28 p. (in Russian). Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200071156> (Accessed December 20, 2018).
12. H. Ingason, Y. Z. Li. Spilled liquid fires in tunnels. *Fire Safety Journal*, 2017, vol. 91, pp. 399–406. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.03.065.
13. N. B. Vargaftik. *Spravochnik po teplofizicheskim svoystvam gazov i zhidkostey* [Reference book on thermal properties of gases and liquids]. 2nd ed. Moscow, Nauka Publ., 1972. 720 p. (in Russian).
14. A. P. Solodov. *Elektronnyy kurs. Glava 18. Teploobmen pri kipenii* [Electronic course. Chapter 18. Heat exchange when boiling] (in Russian). Available at: <http://docplayer.ru/45457268-18-teploobmen-pri-kipenii.html> (Accessed December 10, 2018).
15. G. A. Martynov. Fluctuation theory of liquids. *High Temperature*, 2018, vol. 56, no. 3, pp. 340–350. DOI: 10.1134/S0018151X18030148.
16. E. V. Ametistov, V. V. Klimenko, Yu. M. Pavlov. *Kipeniye kriogennykh zhidkostey* [Boiling of cryogenic liquids]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1995. 400 p. (in Russian).
17. V. G. Baidakov. Attainable superheating of liquefied gases and their solutions (review article). *Low Temperature Physics*, 2013, vol. 39, no. 8, pp. 643–664. DOI: 10.1063/1.4818789.
18. D. W. Plachta, W. L. Johnson, J. R. Feller. Zero boil-off system testing. *Cryogenics*, 2016, vol. 74, pp. 88–94. DOI: 10.1016/j.cryogenics.2015.10.009.
19. K. Bellur, E. F. Médecin, M. Kulshreshtha, V. Konduru, D. Tyrewala, A. Tamilarasan, J. McQuillen, J. B. Leão, D. S. Hussey, D. L. Jacobson, J. Scherschligt, J. C. Hermanson, C. K. Choi, J. S. Allen. A new experiment for investigating evaporation and condensation of cryogenic propellants. *Cryogenics*, 2016, vol. 74, pp. 131–137. DOI: 10.1016/j.cryogenics.2015.10.016.
20. W. U. Notardonato, A. M. Swanger, J. E. Fesmire, K. M. Jumper, W. L. Johnson, T. M. Tomsik. Final test results for the ground operations demonstration unit for liquid hydrogen. *Cryogenics*, 2017, vol. 88, pp. 147–155. DOI: 10.1016/j.cryogenics.2017.10.008.
21. J. P. Holman. *Heat transfer*. 10th ed. New York, McGraw-Hill, 2009. 758 p.
22. L. Vandeboek, J. Berghmans. Safety aspects of the use of LNG for marine propulsion. *Procedia Engineering*, 2012, vol. 45, pp. 21–26. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.08.114.
23. V. S. Ajaev. *Interfacial fluid mechanics: A mathematical modeling approach*. Boston, MA, Springer, 2012. 217 p. DOI: 10.1007/978-1-4614-1341-7.

Материал поступил в редакцию 10 января 2019 г.

Received January 10, 2019

Информация об авторах

ГОРЕВ Вячеслав Александрович, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: kafedrapb@yandex.ru

ОВСЯННИКОВ Дмитрий Леонидович, ООО “Центр пожарной безопасности”, Московская область, г. Пушкино, Российская Федерация; e-mail: ovsyannikov.94@gmail.com

Information about the authors

Vyacheslav A. GOREV, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Integrated Safety in Construction Department, Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation; e-mail: kafedrapb@yandex.ru

Dmitriy L. OVSYANNIKOV, Fire Safety Centre LLC, Moscow Region, Pushkino, Russian Federation; e-mail: ovsyannikov.94@gmail.com