

5. Стрижак П.А., Морозов М.Н. Тепловой режим здания при аварийной работе системы теплоснабжения // Главный энергетик. – 2014. – № 7. – С. 39–45.
6. СП 23.101.2004. Свод правил «Проектирование тепловой защиты зданий». – М.: ФГУП ЦПП, 2004.
7. Малявина Е. Г., Борщев А. Н. Расчет солнечной радиации в зимнее время // АВОК. – 2006. – № 7.

УДК 536

## ОСОБЕННОСТИ ИСПАРЕНИЯ ВОДЫ В ПРОЦЕССЕ ТУШЕНИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

Стрижак П.А., Волков Р.С., Высокоморная О.В., Войтков И.С.

Томский политехнический университет, Томск

E-mail: [vysokomornaja@tpu.ru](mailto:vysokomornaja@tpu.ru)

Одним из наиболее распространенных способов воздействия на лесные пожары с целью их локализации и ограничения скорости распространения пламени является ввод достаточно больших (до нескольких тонн) масс воды в зону горения. Доставка воды в район лесного пожара осуществляется авиацией, поэтому тушащая жидкость сбрасывается, как правило, в массив огня достаточно компактно (без предварительного распыления) в виде «водяного снаряда». Отсутствуют также какие-либо сведения о том, насколько эффективно используется вода в рассматриваемых условиях ее ввода в массив огня. Для дальнейшего развития технологий тушения лесных пожаров целесообразна оценка полноты использования теплоты фазового перехода при движении «водяного снаряда» через массив огня определенной высоты.

Решение этой задачи в полной постановке с учетом влияния всех значимых факторов и процессов пока, очевидно, невозможно. Результаты численного решения задач о движении одиночной капли воды [1] и группы таких капель, ориентированных определенным образом относительно друг друга [2, 3], через высокотемпературные продукты сгорания различных веществ показали необходимость очень длительных вычислений для моделирования процессов тепломассопереноса и фазовых переходов даже при использовании относительно простых моделей [1–3].

Цель настоящей работы – оценка эффективности использования полноты испарения воды при движении «водяного снаряда» через массив высокотемпературных продуктов сгорания лесных горючих материалов на базе упрощенной модели теплопереноса.

Основное положение, являющееся базовым при постановке задачи, заключается в полноте испарения всей жидкости «водяного снаряда» при его движении через высокотемпературные газы. Предполагается,

что время движения является характерным временем жизни «снаряда»  $t_d$ , а объемная скорость испарения равна скорости втекания воды в конкретный объем. При таких условиях вся жидкость, поступившая в элементарный объем за малый промежуток времени (рис. 1), соответствующий скорости движения снаряда, полностью испаряется (фронт испарения движется через пламя с этой скоростью).

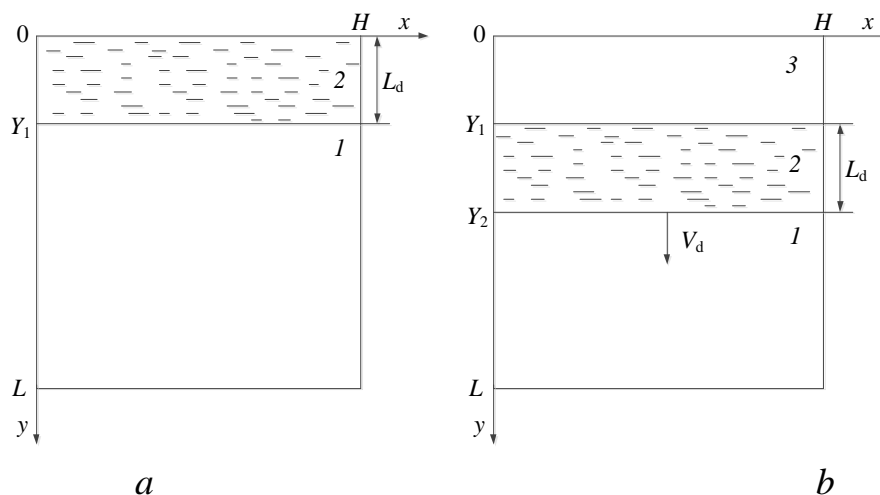


Рис. 1. Схема области решения задачи: 1 – высокотемпературные газы, 2 – «водяной снаряд», 3 – пары воды.

Такая постановка, несмотря на определенные сложности в ее реализации, существенно упрощает анализ комплекса процессов теплопереноса [1–3], характерных для рассматриваемых условий. Полученные по результатам численного анализа температурные поля и изотермы соответствуют варианту полного испарения всей жидкости (идеализация реальной ситуации, позволяющая дать ответ на вопрос о полноте испарения воды при тушении лесных пожаров с применением авиации).

Математическая модель процессов теплопереноса при  $0 < t < t_d$  включает уравнения теплопроводности для системы «водяной снаряд – пары воды – пламя» (рис. 1, б):

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = a_1 \left[ \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} \right] \text{ при } 0 < x < H, Y_2 < y < L, \quad (1)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = a_2 \left[ \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} \right] \text{ при } 0 < x < H, Y_1 < y < Y_2, \quad (2)$$

$$\frac{\partial T_3}{\partial t} = a_3 \left[ \frac{\partial^2 T_3}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_3}{\partial y^2} \right] \text{ при } 0 < x < H, 0 < y < Y_1. \quad (3)$$

$Y_1 = V_d t$ ,  $Y_2 = L_d + V_d t$ , где  $t$  – время, с;  $t_d$  – время полного испарения (существования) «водяного снаряда», с;  $T$  – температура, К;  $a$  – коэффициент температуропроводности,  $\text{м}^2/\text{с}$  ( $a = \lambda / (C\rho)$ );  $\lambda$  –

коэффициент теплопроводности, Вт/(мК);  $C$  – коэффициент теплоемкости, Дж/(кгК);  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $x, y$  – координаты декартовой системы, м;  $H, L$  – размеры области решения, м;  $V_d$  – линейная скорость движения «снаряда», м/с;  $L_d$  – характерный продольный размер снаряда, м; индексы: 1 – высокотемпературные газы, 2 – «водяной снаряд», 3 – пары воды.

Начальные ( $t=0$ ) условия (рис. 1, а):  $T=T_0$  при  $0 < x < H, 0 < y < Y_1$ ;  $T=T_f$  при  $0 < x < H, Y_1 < y < L$ , где  $T_0$  – начальная температура «водяного снаряда»,  $T_f$  – начальная температура газов (продуктов сгорания лесных горючих материалов).

Граничные ( $0 < t < t_d$ ) условия (рис. 1, б)

$$x=0, x=H, 0 < y < Y_1 \quad T=T_f; \quad (4)$$

$$x=0, x=H, Y_1 < y < Y_2 \quad \frac{\partial T_2}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

$$x=0, x=H, Y_2 < y < L \quad T=T_f; \quad (6)$$

$$y=0, 0 < x < H \quad \frac{\partial^2 T_3}{\partial y^2} = 0; \quad (7)$$

$$y=Y_1, 0 < x < H \quad -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} = -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial y}, T_2=T_3; \quad (8)$$

$$y=Y_2, 0 < x < H \quad -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} - Q_e W_e, T_1=T_2; \quad (9)$$

$$y=L, 0 < x < H \quad T=T_f, \quad (10)$$

где  $Q_e$  – тепловой эффект испарения, Дж/кг;  $W_e$  – массовая скорость испарения, кг/(м<sup>2</sup>с).

Для вычисления массовой скорости испарения использовалось выражение:

$$W_e = \phi \rho_2 V_d, \quad (11)$$

где  $\phi$  – объемная доля жидкости в «водяном снаряде».

Характерный продольный размер «снаряда»  $L_d$  пересчитывался на каждом временном шаге аналогично моделям [1–3]. Поперечный размер  $H_d$  считался постоянным.

При постановке задачи не рассматривались процессы вдува водяных паров с нижней ( $y=Y_2, 0 < x < H$ ) и вертикальных ( $x=0, x=H, Y_1 < y < Y_2$ ) границ «водяного снаряда» в зоны, разделяющие воду и пламя. При учете этих процессов испарение происходит менее интенсивно (вдув паров значительно снижает тепловые потоки к поверхностям фазового перехода) при прочих неизменных условиях. Поэтому сформулированная система уравнений (1)–(3) и краевых условий (4)–(10) описывает теплоперенос в рассматриваемой системе (рис. 1) при максимально возможных скоростях испарения воды. Все ниже приведенные оценки по эффективности использования теплоты

испарения воды являются верхними. В реальной практике коэффициент полезного использования тушащей жидкости может быть существенно меньше.

Система нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных (1)–(3) с начальными и граничными условиями (4)–(10) решалась с использованием методов и алгоритмов, описанных в [4–7].

Численные исследования выполнены при следующих типичных значениях параметров процесса [8, 9]: начальная температура воды  $T_0=300$  К; температура продуктов сгорания лесных горючих материалов принималась равной средней температуре пожара  $T_f=1170$  К; тепловой эффект испарения воды  $Q_e=2.26$  МДж/кг; начальные размеры «снаряда»  $H_d=1$  м,  $L_d=0.1$  м; размеры области решения  $H=1$  м,  $L=15$  м; скорость движения «снаряда» в отличие от [2, 3] принималась постоянной из диапазона  $V_d=0.5\div 5$  м/с. Теплофизические характеристики воды, водяных паров и продуктов сгорания лесных горючих материалов приведены в [8, 9].

При анализе макроскопических закономерностей движения «водяного снаряда» через высокотемпературные продукты сгорания с использованием сформулированной модели теплопереноса (1)–(11) одной из задач было определение значений  $\varphi$ , при которых температура на границе раздела фаз («жидкость – продукты сгорания») находится в пределах реально возможных (не выше температуры кипения воды при нормальном давлении). Приведенные в [2, 3] изотермы показывают, что температура на границах фазового перехода при движении одиночной и нескольких капель воды через высокотемпературные продукты сгорания составляет около  $T_e=373$  К. Небольшие отклонения температур (до 5 К) на границе «жидкость – газ» для отличающихся одна от другой моделей теплопереноса [2, 3] можно объяснить изменением скоростей движения капель под действием сил тяжести и сопротивления в достаточно широком диапазоне (от 0.5 до 5 м/с) при  $0 < t < t_d$ , а также различным положением границ вдува паров воды относительно направления движения (фронтальная, задняя и боковые поверхности капель). В качестве первого приближения с использованием рассматриваемой модели (рис. 1) проанализированы условия испарения «снаряда», движущегося с постоянной скоростью  $V_d=1$  м/с.

Граничные условия (9) и выражение для массовой скорости испарения (11) показывают, что температура на границе «водяной снаряд – продукты сгорания» может быть близка к некоторому постоянному во времени ( $0 < t < t_d$ ) значению  $T_e$  в условиях  $V_d=\text{const}$

только при  $W_e = \text{const}$  ( $\varphi = \text{const}$ ). Установлено, что при  $V_d = 1$  м/с значение объемной доли жидкости в «водяном снаряде», полностью испаряющейся при его движении через пламя, составляет  $\varphi = 0.2 \cdot 10^{-3}$ . При таких условиях температура на границе раздела фаз равна  $T_e \approx 375$  К, что хорошо коррелирует с результатами [2, 3]. Представляет интерес оценка возможного изменения температуры  $T_e$  в процессе движения «снаряда» при определенном  $\varphi$ .

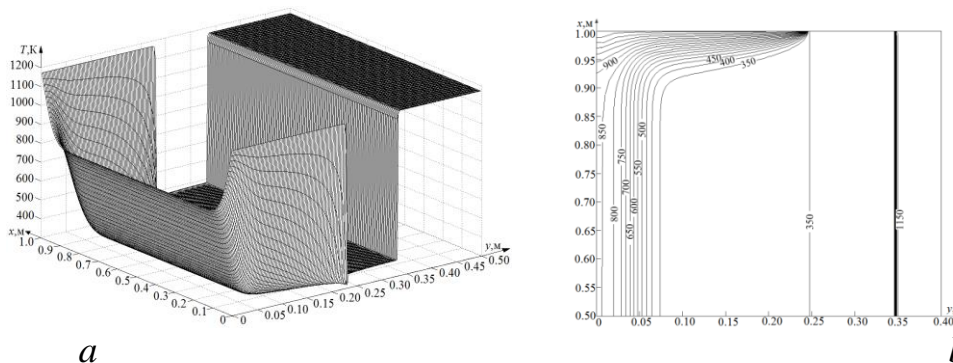


Рис. 2. Температурное поле (а) и изотермы (б) при  $t = 0.25$  с и  $\varphi = 2 \cdot 10^{-4}$ .

На рис. 2 и 3 приведены температурные поля и изотермы для рассматриваемой системы (рис. 1) на начальном ( $t = 0.25$  с) и конечном ( $t = 10$  с) участках траектории движения «снаряда». Так как средние значения высоты пламени для лесных пожаров составляют  $10 \div 15$  м [20], то можно считать времена  $t \approx 10$  с при  $V_d = 1$  м/с соответствующими конечным участкам траектории движения сбрасываемых «снарядов». В результате анализа температурных полей, приведенных для времен, характеризующих начальный период и конечные времена движения «снаряда», можно сделать вывод о выполнении условия  $T_e \approx 375$  К при  $0 < t < t_d$ .

Установленное значение объемной доли жидкости в «снаряде» –  $\varphi = 0.2 \cdot 10^{-3}$  показывает, что для снижения температуры до минимально возможных значений достаточно очень малой доли непосредственно жидкости в объёме «водяного снаряда». Это можно объяснить большим значением теплоты фазового перехода для воды –  $Q_e = 2.26$  МДж/кг. При такой теплоте  $Q_e$  температура вблизи границы фазового перехода, несмотря на высокие температуры продуктов сгорания  $T_f$ , принимает умеренные значения  $T_e$  (рис. 3). Так как температура продуктов сгорания практически не изменяется по высоте пламени ( $T_1 = T_f$ ), то условия испарения при  $0 < t < t_d$  не меняются (убыль массы «снаряда» невелика и постоянна).

На рис. 2 и 3 видно, что область относительно низких температур за «водяным снарядом» – «температурный» след сужается. Динамика

изменения характерных размеров этой области показывает (рис. 2, 3), что при прохождении водой даже половины пути относительно рассматриваемых высот пламени в начальной точке траектории движения температура смеси продуктов сгорания и водяных паров будет близка к  $T_f$ . Это иллюстрирует низкую эффективность сбрасывания воды в зону горения с малыми временами непосредственного испарения.

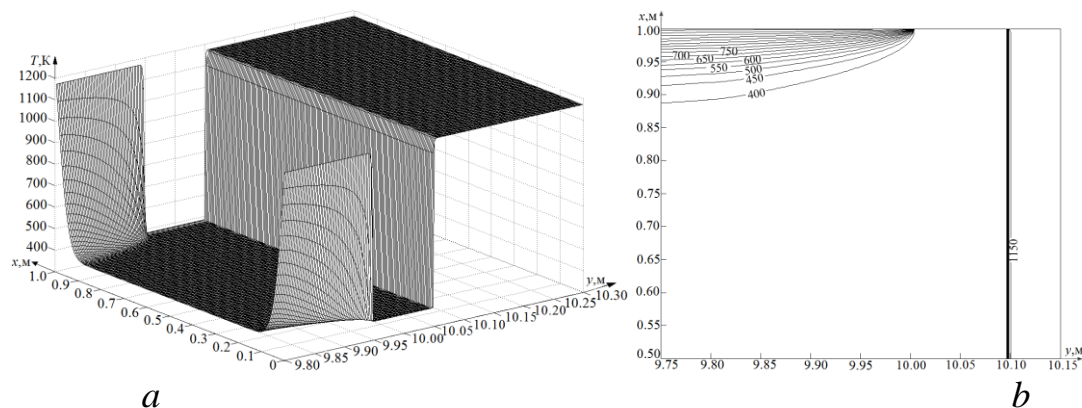


Рис. 3. Температурное поле (а) и изотермы (б) при  $t=10$  с и  $\phi=2 \cdot 10^{-4}$ .

Изотермы, приведенные на рис. 2 и 3, а также температурные поля и поля концентраций паров воды [2, 3] показывают, что целесообразно увеличение площади испарения воды в «снаряде» за счет ее распыления. В таких условиях существенно возрастет влияние процесса испарения на температуру в следе движения «снаряда». Также усилится влияние вдуваемых паров воды [2, 3] (определяющую роль будет играть как теплообмен с холодными водяными парами, так и вытеснение ими окислителя, газообразных компонентов горючего и продуктов сгорания).

Анализ результатов проведенного численного моделирования процесса теплопереноса в области прохода «водяного снаряда» через пламя лесного пожара показывает, что эффективность использования теплоты испарения воды в типичных условиях тушения составляет менее 0.1 %. Если учесть, что выполненные оценки являются верхними, то можно сделать вывод о целесообразности совершенствования технологий тушения лесных пожаров с использованием авиации (в первую очередь за счет распыления тушащей воды).

Предложен новый подход к оценке эффективности использования теплоты испарения воды в типичных условиях тушения лесных пожаров. По результатам численного моделирования процессов теплопереноса в области прохода «водяного снаряда» через пламя можно сделать вывод о низкой эффективности использования тушащей

жидкости в рамках современных технологий тушения лесных пожаров с применением авиации.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 14–39–00003).*

Список литературы:

1. O.V. Vysokomornaya, G.V. Kuznetsov, and P.A. Strizhak, Journ. of Eng. Phys. and Thermophys. 1, 86 (2013).
2. D.O. Glushkov, G.V. Kuznetsov, and P.A. Strizhak, Math. Probl. in Eng. 2014 (2014).
3. P.A. Strizhak, Journ. of Eng. Phys. and Thermophys. 4, 86 (2013).
4. D.O. Glushkov, G.V. Kuznetsov, and P.A. Strizhak, Russ. Journ. of Physic. Chem. B 5 (2014).
5. D.O. Glushkov, G.V. Kuznetsov, and P.A. Strizhak, Adv. in Mech. Eng. 2014 (2014).
6. O.V. Vysokomornaya, G.V. Kuznetsov, and P. A. Strizhak, Math. Probl. in Eng. 2014 (2014).
7. P.A. Strizhak, Journ. of Eng. Thermophys. 4, 20 (2011).
8. J.O. Hirschfelder, C.F. Curtiss, and R.B. Bird, Molecular Theory of Gases and Liquids (John Wiley and Sons, New York, 1954).
9. N.B. Vargaftik, L.P. Filipov, A.A. Tarzimanov, E.E. Totskii, Handbook of Thermal Conductivity of Liquids and Gases (CRC Press, Inc., Boca Raton, 1994).

УДК 536.468

## **ВЛИЯНИЕ ГЕТРОГЕННОЙ СТРУКТУРЫ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА НА УСЛОВИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ**

Сыродой С.В.<sup>1</sup>, Саломатов В.В.<sup>2</sup>, д.т.н., Гутарева Н.Ю.<sup>2</sup>, к.п.н.

<sup>1</sup>Томский политехнический университет. г. Томск.

<sup>2</sup>Институт теплофизики СО РАН. г. Новосибирск

E-mail: [ssyrodoy@yandex.ru](mailto:ssyrodoy@yandex.ru)

Для сжигания низкосортных и низкокалорийных топлив, необходимы новые эколого- и энергоэффективные технологии, например, с использованием водоугольного топлива (ВУТ) [1,2]. Это новый вид топлива, который представляет собой высококонцентрированную суспензию, состоящую из угля, воды и присадок пластификаторов [3], сохраняющих гомогенную структуру. Однако при рассмотрении таких сложных топливных композиций возникают проблемы, связанные с определением эффективных теплофизических характеристик, влияющих на условия зажигания. С целью оценки влияния различных моделей теплофизических свойств ВУТ на динамику воспламенения использовались следующие методики.