

Доклад-1: ДВУХФРОНТОВОЕ ГОРЕНИЕ ВОКРУГ ЧАСТИЦЫ ТОПЛИВА В СМЕСИ ВОЗДУХА С МАЛОЙ ДОБАВКОЙ ГОРЮЧЕГО ГАЗА

Полетаев Н.Л.

ФГБУ ВНИИПО МЧС России, Московская область, г.Балашиха

nlpvniipo@mail.ru

Теоретические особенности диффузионного горения капли топлива в воздухе впервые изучены Г. А. Варшавским [1]. Одно из направлений развития этих результатов связано с решением более общей задачи о горении капли в гибридной атмосфере - смеси воздуха с добавкой горючего газа, не превышающей нижнего концентрационного предела распространения плоского пламени по газозудной смеси (НКПР). Эта задача решалась С.К. Law в [2] с ошибочным предположением о существовании вокруг частицы единственного фронта пламени (см. рис.1а).

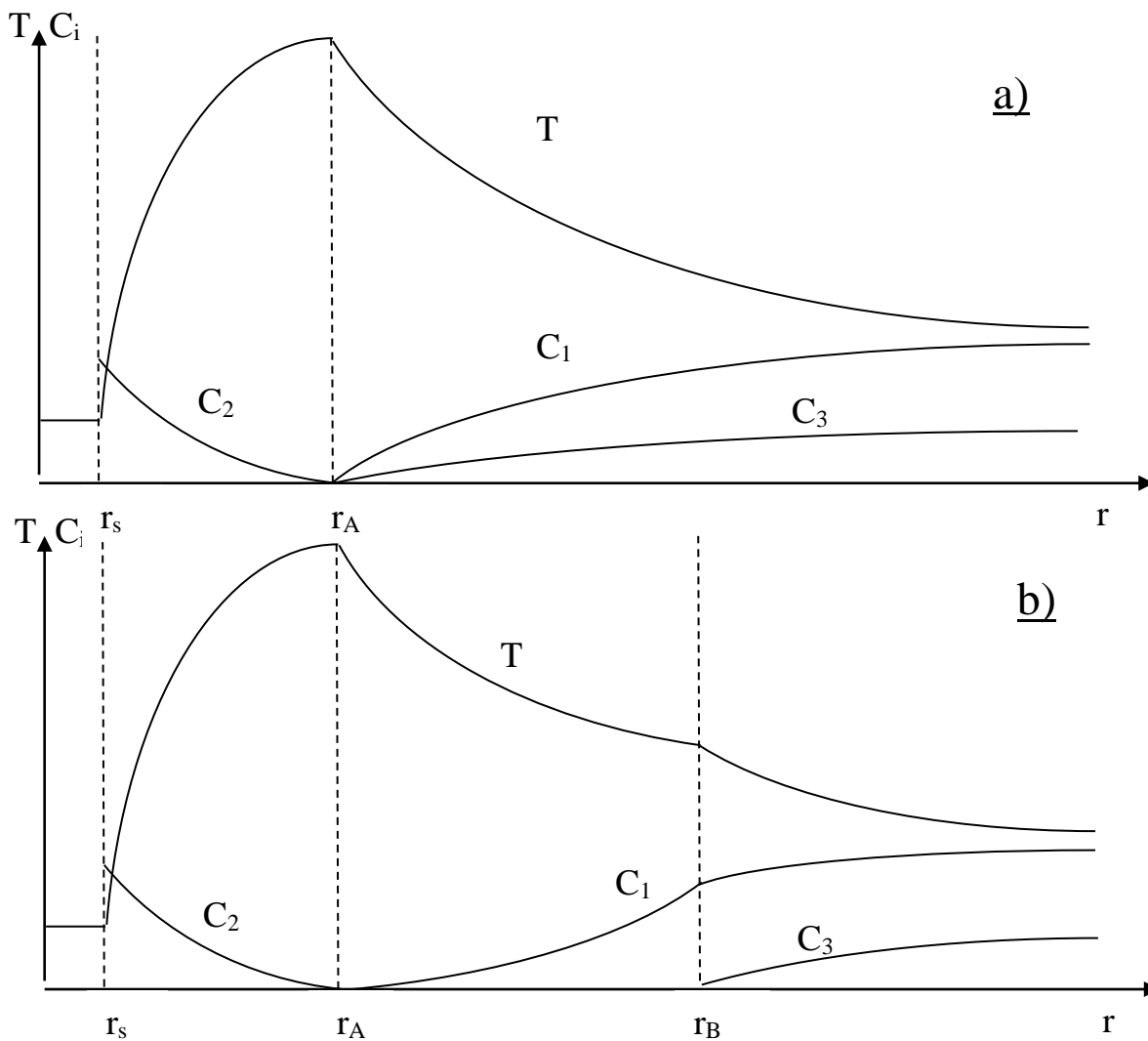


Рис. 1. Схема распределения концентрации компонентов C_i и температуры T газовой фазы в окрестности горящей частицы для случаев одного (а) и двух (б) фронтов пламени. Индексы 1, 2, 3, s, А, В относятся к окислителю, парам горючего, добавке газа, капле и фронтам пламени соответственно; r - расстояние от центра капли.

Ошибка состояла в том, что автор [2] не учел снижения нижнего концентрационного предела распространения пламени по газозвушной смеси (далее - НКПР) с ростом температуры смеси. Из-за высокой температуры в области, прилегающей к внешней стороне фронта пламени на рис.1а, негорючая на большом удалении смесь воздуха с добавкой горючего газа становится способной распространять пламя в упомянутой области. Предполагаемый в [2] единый фронт с необходимостью должен испытать расщепление на два фронта, внешний из которых придет в движение к периферии и остановится на некотором расстоянии r_B (см.рис.1б.), которое будет определяться условием (1) стационарного существования данного фронта пламени. Ближайший к частице фронт пламени (А) имеет ту же природу, что и единственный диффузионный фронт пламени вокруг частицы, горящей в чистом воздухе [1]. Во втором фронте пламени (В) происходит диффузионное горение перемешанной смеси газа с воздухом [3].

Здесь и далее имволами r , r_s , ρ , c_p , λ , V , T , L , Q , β , D , C , W , n обозначены соответственно радиальная координата точки пространства, отсчитываемая от центра частицы, радиус частицы, плотность, теплоемкость, коэффициент теплопроводности, скорость течения и температура газовой фазы, теплота испарения топлива, теплота сгорания, массовый стехиометрический коэффициент, коэффициент диффузии, относительная массовая концентрация, массовая скорость изменения содержания вещества вследствие химической реакции, порядок реакции горючего газа с кислородом воздуха.

Величины, отмеченные нижними индексами ∞ , 1, 2, 3, 4, s , А и В, относятся соответственно к начальным значениям параметров, кислороду воздуха, парам топлива, горючему газу, инертному газу (в состав которого входят продукты окисления, а также азот и другие инертные компоненты воздуха), частице, фронту А и фронту В. Нормированные (безразмерные) параметры задачи, как правило, отмечаются символом *.

Доклад посвящен исследованию сферически симметричного стационарного двухфронтного горения вокруг неподвижной частицы топлива в гибридной атмосфере. Для получения результатов в аналитическом виде сделан ряд распространенных или упрощающих решение допущений. Предполагалась равенство и постоянство теплофизических характеристик компонентов газовой фазы, число Льюиса (за возможным исключением для числа Льюиса добавленного газа Le_3) составляло 1. Химическая реакция не меняет общего числа молекул. Газовая фаза подчиняется уравнению состояния идеального газа. Зависимость скорости химической реакции от температуры является достаточно резкой, чтобы аппроксимировать зоны химического превращения вокруг частицы сферами, являющимися поверхностями разрыва первых производных параметров задачи. Пренебрегается действием силы тяжести и теплотерями на излучение. Частица однородно нагрета до температуры T_s , близкой к температуре кипения, и имеет бесконечно большую плотность, исключаяющую уменьшение радиуса частицы при горении.

Стационарные распределения концентрации компонентов C_i и температуры T газовой фазы вне узких зон химического превращения ($r = r_A$ и $r = r_B$) описываются уравнениями диффузии и теплопроводности. Данные уравнения вместе с уравнением состояния газовой фазы и условием неразрывности потока среды (вызванного испарением капли) представляют систему уравнений поставленной задачи. Граничные условия на поверхности частицы $r = r_s$, на большом удалении от частицы $r \rightarrow \infty$, на поверхностях разрыва $r = r_A$ и $r = r_B$ отвечают начальным условиям и требованиям непрерывности T и C_i , сохранения массы и энергии. Кроме того, потребуется дополнительное условие: баланс между плотностью

потока горючего газа $J_{3В}$ во фронт В и скоростью $M_{3В}$ переработки газа единицей площади поверхности данного пламени [3]:

$$J_{3В} = M_{3В}. \quad (1)$$

Решение полученной системы уравнений иллюстрируется на примере горения сферической частицы модельного газифицирующегося топлива с температурой $T_s = 998$ К. Продуктом газификации считается этан. Рассмотрены два варианта добавки модельного газа к воздуху. В первом варианте (I) исследования к воздуху добавляется этан (НКПР = 3% об.; $Le_3 = 1$; $T_{min} = 1500$ К). Во втором варианте (II) исследования к воздуху добавляется газ, с параметрами, идентичными параметрам водорода (НКПР = 8% об.; $Le_3 = 3,6$; $T_{min} = 1000$ К).

На рис.2, рис.3 и рис. 4 приводятся графики расчетных зависимостей размера и температуры диффузионных пламен от содержания горючего газа в воздухе и от радиуса частицы с использованием безразмерных параметров: $r^* = r/r_s$; $C_{3\infty}^* = C_{3\infty}/(Le_3 \cdot \text{НКПР})$.

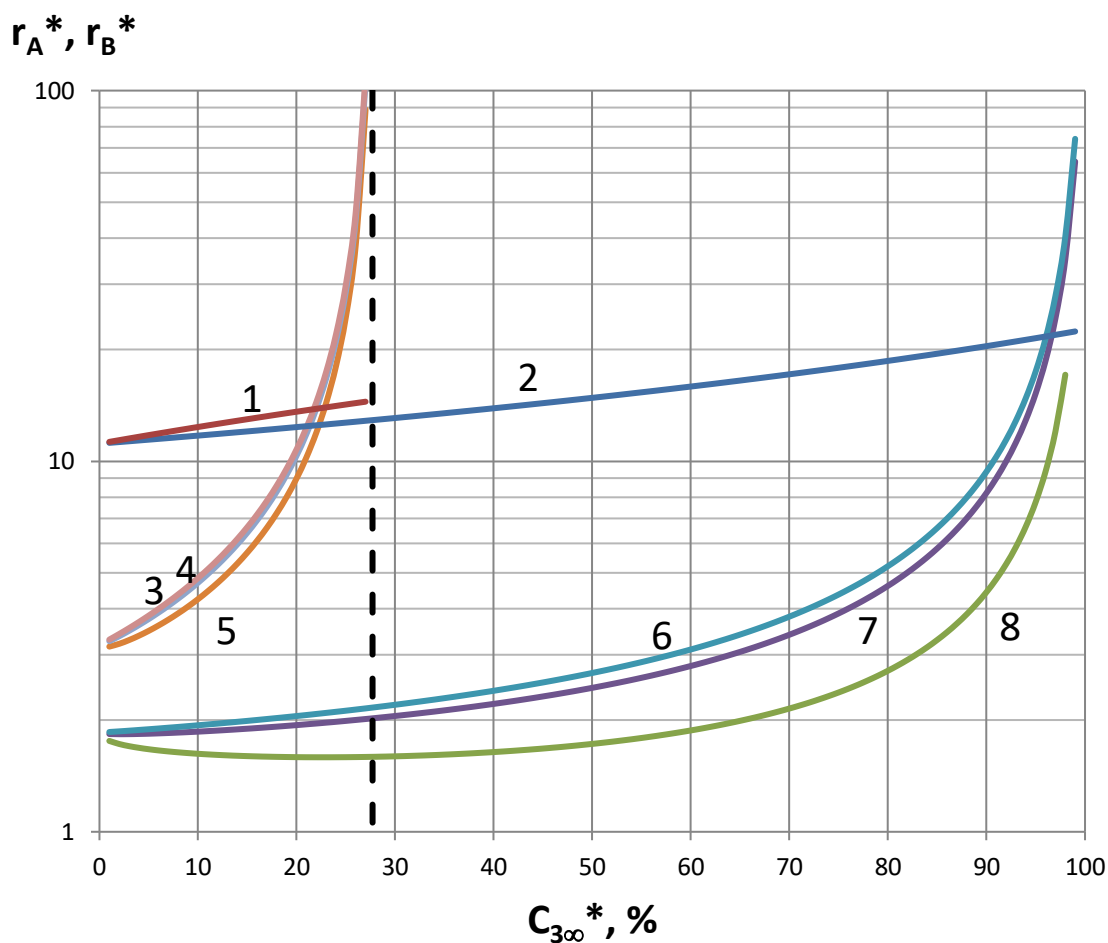


Рис. 2. Зависимость размера фронта А (кривые 1, 2) и фронта В (кривые 3 – 8) от содержания горючего газа в воздухе и (только для фронта В) от радиуса частицы. К вариантам I и II задачи относятся кривые 2, 6 – 8 и 1, 3 – 5 соответственно. Соответствие номера кривой и радиуса частицы: 3, 6 – 150 мкм; 4, 7 – 20 мкм; 5, 8 – 5 мкм.

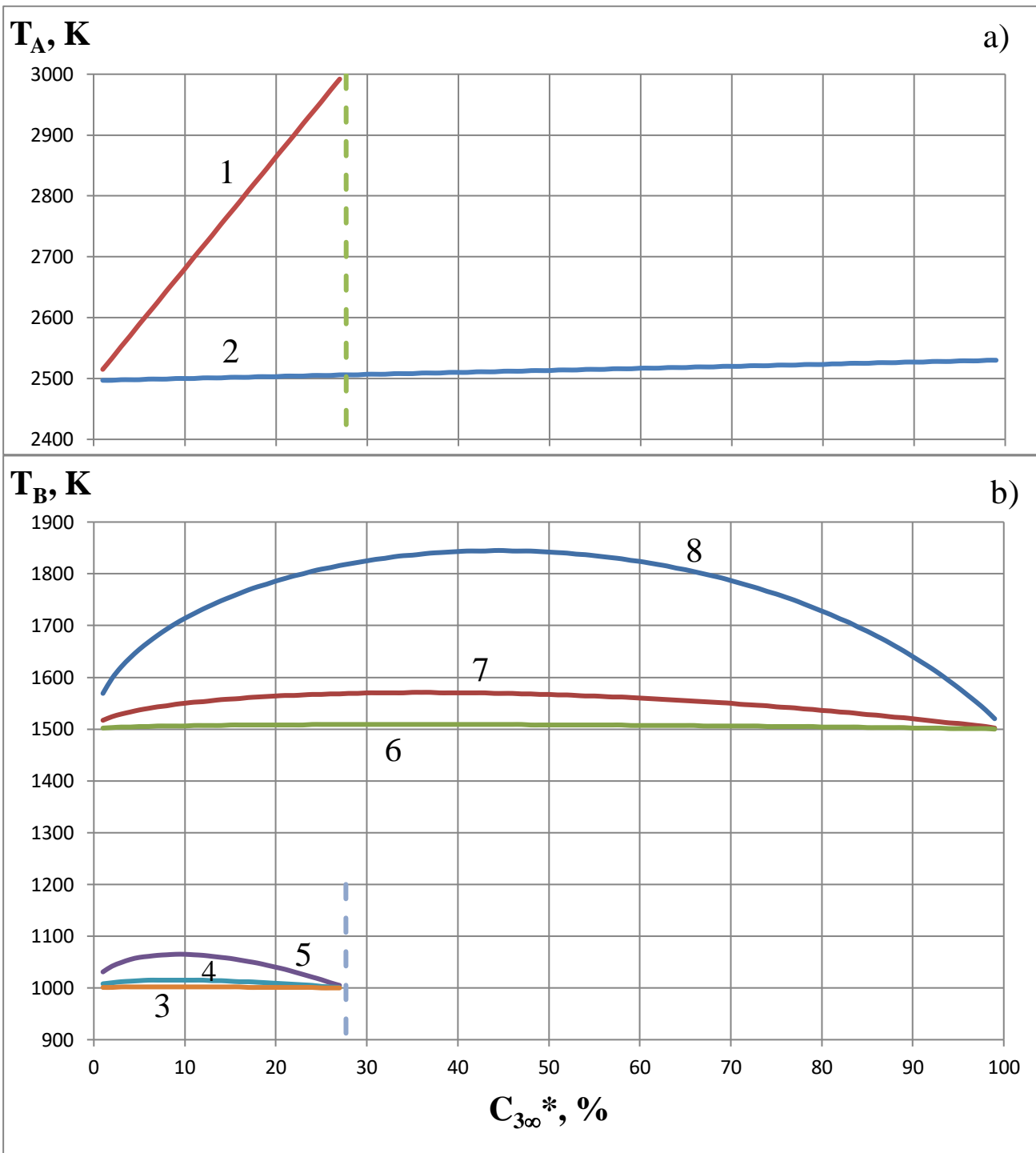


Рис. 3. Температура во фронте А (а) и во фронте В (b) в зависимости от содержания горючего газа в воздухе и (только для фронта В) от радиуса частицы. К вариантам I и II задачи относятся кривые 2, 6 – 8 и 1, 3 – 5 соответственно. Соответствие номера кривой и радиуса частицы: 3, 6 – 150 мкм; 4, 7 – 20 мкм; 5, 8 – 5 мкм.

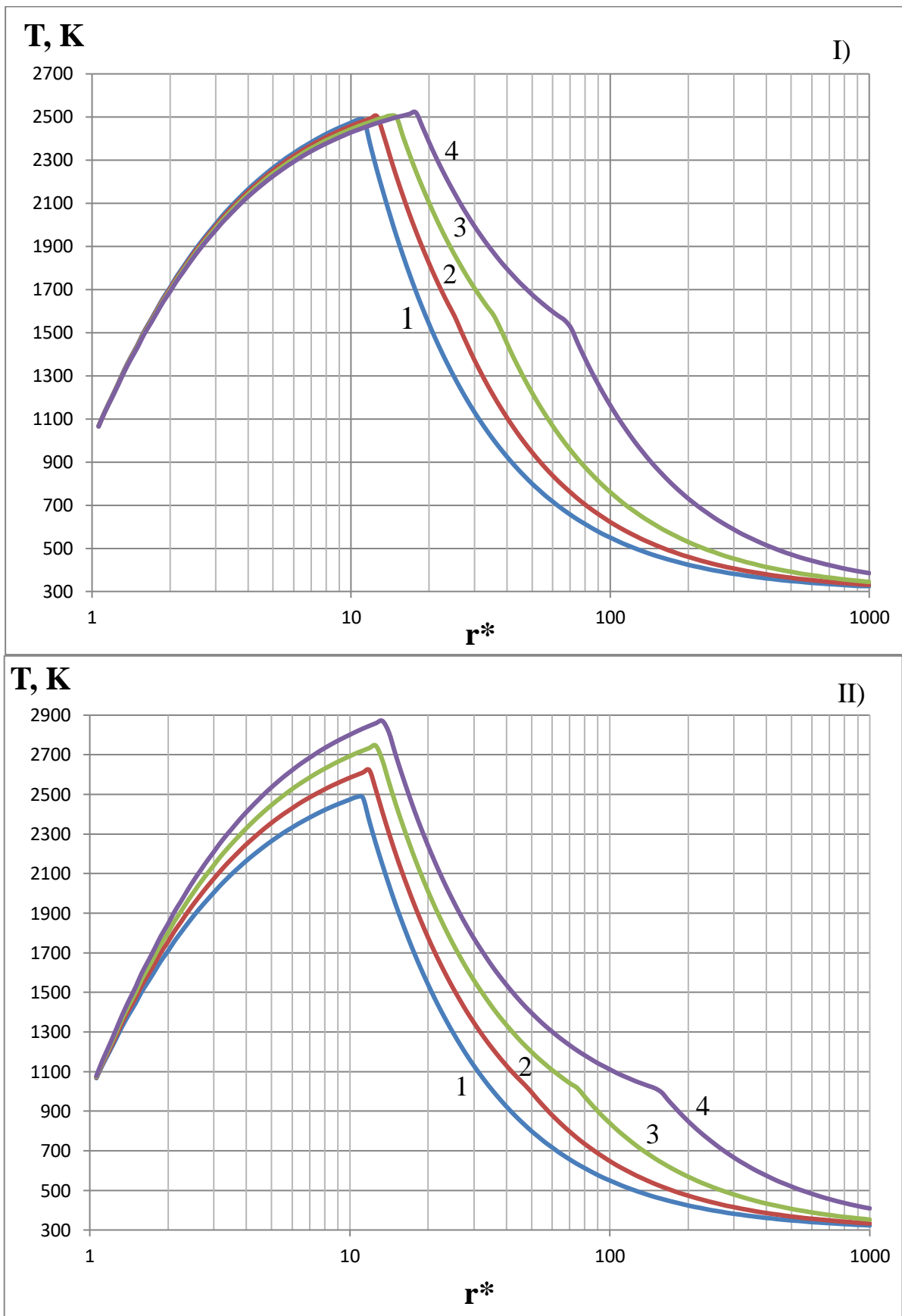


Рис. 4. Распределение температуры в окружающую горящую частицу ($r_s \geq 20$ мкм) пространстве при различном содержании горючего газа в воздухе для варианта I и варианта II задачи. Кривые 1, 2, 3 и 4 отвечают $C_{3\infty}^* = 0\%$, 25%, 50% и 75% от НКПР* соответственно.

Выражения для размера и температуры первого фронта пламени вокруг горячей частицы имеют вид

$$r_A^* = \frac{\ln \left[1 + C_{1\infty} Q_2 / L \beta_2 + C_{3\infty} \left(Q_3 Le - Q_2 \beta_3 / \beta_2 \right) / L - c_p (T_s - T_\infty) / L \right]}{\ln(1 + C_{1\infty} / \beta_2 - C_{3\infty} \beta_3 / \beta_2)}; \quad (2)$$

$$T_A = \frac{\beta_2 T_\infty + C_{1\infty} (Q_2 - L + c_p T_s) / c_p + C_{3\infty} [\beta_2 Le_3 Q_3 - \beta_3 (Q_2 - L + c_p T)] / c_p}{\beta_2 + C_{1\infty} - C_{3\infty} \beta_3},$$

где $r_A^* = r_A / r_s$. Данные выражения являются точными при $Le = 1$, и, следовательно, являются точными для варианта I задачи.

Привести аналитические выражения для размера и температуры второго пламени в общем случае представляется затруднительным, однако это оказывается возможным при $r_s > 20$ мкм. В этом случае согласно рис. 3 (b) справедливо приближительное равенство

$$T_B \approx T_{b,\min.}$$

во всем диапазоне рассматриваемых значений $C_{3\infty}^*$ обоих вариантов задачи. Используя вместо (1) соотношение (4), получим

$$r_B^* \approx \frac{(C_{1\infty} - C_{3\infty} \beta_3) [Q_2 - L - c_p (T_{b,\min} - T_s) + C_{3\infty} (Le - 1) Q_3 / 2]}{\beta_2 [c_p (T_{b,\min} - T_\infty) - C_{3\infty} Q_3 Le]}. \quad (3)$$

Графики для фронта А и при $r_s \geq 20$ мкм для фронта В получены на основе решения задачи в аналитическом виде, которое ввиду громоздкости здесь не приводится.

Графики для фронта В при $r_s < 20$ мкм получены методом численного интегрирования системы уравнений задачи. Также численно подтверждена устойчивость фронта В к сферически симметричным возмущениям параметров задачи при концентрации горючего газа, ниже критической, равной $НКПР^* = НКПР / Le_3$. С превышением данной концентрации горючего газа стационарное решение задачи отсутствует.

Отметим с учетом (2) и (3) геометрическое подобие полей распределения температуры в пространстве для частиц различных размеров.

При $Le_3 > 1$ в области, ограниченной поверхностью фронта В, отмечается сверхadiaбатическая температура среды, что соответствует эффекту, описанному для сферически симметричного диффузионного горения в перемешанной смеси горючего газа с окислителем [3]. Функция распределения температуры в пространстве между фронтами А и В линейно растет с увеличением содержания горючего газа.

Список литературы

1. Варшавский Г.А. Горение капли жидкого топлива. В кн.: Теория горения порохов и взрывчатых веществ. – М.: Наука, 1982. – С. 87 – 107.
2. Law C. K. Deflagration and extinction of fuel droplet in a weakly-reactive atmosphere / J. Chem. Phys. 1978. – Vol. 68. – P. 4218–4221. doi: 10.1063/1.436286.
3. Зельдович Я. Б., Баренблатт Г. И., Либрович В. Б., Махвиладзе Г. М. Математическая теория горения и взрыва. М.: Наука, 1980. - 478 с.