

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ТЕПЛОВОГО НАГРУЖЕНИЯ ПОЛОГА ЛЕСА ПРИ ПЕРЕХОДЕ НИЗОВОГО ПОЖАРА В ВЕРХОВОЙ

Вопросы математического моделирования лесных пожаров в последние годы часто обсуждаются в литературе [1—3]. Теоретически наиболее исследованы вопросы моделирования распространения верховых пожаров [3]. Не менее важно изучение собственно процесса возникновения верхового пожара, т. е. перехода горения из нижнего яруса леса в кроны деревьев. Анализ экспериментальных исследований [4—6] показывает, что при прогнозировании и профилактике перехода низового пожара в верховой, в частности, необходимо изучение тепло- и массопереноса продуктов горения низового пожара. В [4] даются оценки характерных времен различных стадий зажигания элементов полога, из которых следует, что инертный прогрев и сушка элементов, предшествующая их газификации и воспламенению газовой смеси, наиболее продолжительны. Особенно большую роль при зажигании растительных материалов играет стадия сушки [4].

При распространении низового лесного пожара горючие элементы полога леса находятся в зоне его воздействия ограниченное время [5], в связи с чем для оценки возможности перехода низового пожара в верховой требуется детальное исследование прогрева и сушки полога в условиях воздействия низового пожара.

Будем моделировать низовой пожар плоским поверхностным источником тепла и массы радиусом Δ_r . Считаем, что физические свойства газообразных продуктов горения низового пожара близки свойствам воздуха [1—3]. Полог леса отстоит от очага низового пожара на высоту h_2 и включает наряду с газовой к-фазу, состоящую из сухого органического вещества и влаги [3] и представляющую собой неподвижную среду из одинаковых элементов, равномерно распределенных и хаотично ориентированных в пространстве. Система координат, взаимное расположение очага пожара и полога леса, а также структура течения показаны на рис. 1.

Рассмотрим молодые сосновые леса, наиболее подверженные верховым пожарам. Такие леса характеризуются высотой деревьев 2—5 м, высокими значениями удельной поверхности s лесных горючих материалов (ЛГМ) ($s \approx 10 \div 20 \text{ 1/м}$). В них практически отсутствуют горизонтальные движения воздуха (ветер), в связи с чем естественно допущение — задача рассматривается в осесимметричной постановке. Течение продуктов горения имеет развитый турбулентный характер. По причинам, указанным выше, до начала газификации ЛГМ можно не учитывать физико-химические превращения. Это не относится к сушке, которую описываем подобно [1], где обоснована возможность использования аналога закона Герца — Кнудсена и даны эффективные кинетические константы. Поскольку при переходе низового пожара в верховой лимитирующими являются стадии прогрева и сушки ЛГМ, то использовавшееся в [1, 3] приближение одинаковости температуры газовой и конденсированной фаз в данном случае требует проверки. Определенную

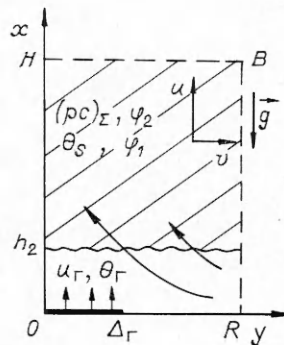


Рис. 1. Схема взаимодействия очага низового пожара с пологом леса.

роль в процессе перехода может играть излучение пламени низового пожара [5]. При оценке роли излучения считаем газовую фазу прозрачной [1]. Наличие дисперсной фазы (дыма) в пологе обусловлено его поступлением из очага низового пожара и дымообразованием из ЛГМ полога при пиролизе. Так как данное исследование ограничено лишь изучением процесса прогрева и сушки (которые предшествуют пиролизу), то дымообразование не учитывается. В данной работе рассматриваются лишь интенсивные низовые пожары, во фронте которых дымообразование минимально.

Ограничимся рассмотрением неподвижного очага низового пожара, мощность которого нарастает во времени и достигает стационарного значения за конечный промежуток времени. Очевидно, такое приближение моделирует более благоприятные условия для перехода низового пожара в верховой.

В настоящей работе сделана оценка влияния различных физических допущений, о которых говорилось выше, часто используемых при математическом моделировании лесных пожаров [1—3], на описание процесса перехода. Учет этих допущений приводит к соответствующим изменениям в математической постановке задачи. Поэтому представляется удобным вместо всех законов сохранения записать два обобщенных уравнения с последующей расшифровкой их членов для каждого уравнения (их всего 8) и каждого конкретного уровня моделирования (их всего 4).

Модель 1. Влага в пологе леса отсутствует. Температуры газовой и конденсированной фаз совпадают. Излучение от пламени низового пожара не учитывается.

Модель 2. Полог влажный; остальное аналогично модели 1.

Модель 3. Температуры газовой и ж-фазы различны; остальное — как в модели 2.

Модель 4. Учитывается излучение от пламени; остальное аналогично модели 3.

Обобщенные безразмерные уравнения имеют следующий вид:

$$\frac{\partial \rho \Phi}{\partial t} + \frac{1}{x_2^{j-1}} \frac{\partial}{\partial x_j} (x_2^{j-1} \rho u_j \Phi) = \frac{1}{x_2^{j-1}} \frac{\partial}{\partial x} (x_2^{j-1} \tau_{\Phi j}) + S_{\Phi}, \quad j = 1, 2; \quad (1)$$

$$c_F \frac{\partial F}{\partial t} = S_F. \quad (2)$$

По повторяющимся индексам производится суммирование. Расшифровка членов уравнений (1), (2) приведена в табл. 1 и 2 соответственно.

Выписанную систему уравнений дополняют следующие соотношения [1, 7—9]:

$$\begin{aligned} \mu &= c_{\mu} \rho k^2 / \varepsilon, \quad (\rho c)_{\Sigma} = c_1 \rho_1^0 \varphi_{1H} + c_2 \rho_2^0 \varphi_2, \\ W &= \rho_2^0 Da_1 \frac{\varphi_2}{\sqrt{1 + \Theta_s}} \exp\left(-\frac{E_1}{1 + \Theta_s}\right), \quad \alpha = \frac{Nu}{L_s Pe}, \\ Nu &= 2 + 0,31 Re_0^{0,58} + 0,27 Re_0^{0,54} \quad (\text{при } Pr = 0,72), \\ Re_0 &= Re |\vec{V}| \rho L_s, \\ E &= \frac{\varepsilon_r \varepsilon_s T_{\Pi}^4}{\pi Bo} \int_{S_r} K_s \frac{\cos \beta}{L^2} dS. \end{aligned} \quad (3)$$

В (3) использованы следующие обозначения: ε — скорость диссипации энергии турбулентности; $c_1, c_2, \rho_1^0, \rho_2^0, \varphi_1, \varphi_2$ — теплоемкости, истинные плотности и объемные доли сухого органического вещества ЛГМ (индекс 1) и влаги (2); E_1 — энергия активации процесса сушки; L_s, L, L_s — характерный размер ЛГМ, расстояние между элементом излучающей поверхности и элементом полога леса, часть L , лежащая в пологе; β — угол между нормалью к поверхности пламени и направлением на

Таблица 1

Мо- дель	Φ	$\tau_{\Phi j}$	S_{Φ}
1—4	1	0	0
	u_i	$\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} (\mu \operatorname{div} \vec{V} + \rho k)$	$-\frac{\partial p}{\partial x_i} - S c_d \rho u_i \vec{V} + \delta_{i1} \frac{\rho_e - \rho}{Fr}$
	k	$\frac{\mu}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j}$	$P + G - \rho \varepsilon$
	ε	$\frac{\mu}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}$	$\frac{\varepsilon}{k} [c_{\varepsilon 1} (P + G) (1 + c_{\varepsilon 3} R_T) - c_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon]$
1	θ	$\frac{\mu}{\sigma_T} \frac{\partial \theta}{\partial x_j}$	$-(\rho c)_\varepsilon \frac{\partial \theta}{\partial t}$
2	θ	$\frac{\mu}{\sigma_T} \frac{\partial \theta}{\partial x_j}$	$-(\rho c)_\varepsilon \frac{\partial \theta}{\partial t} - qW$
3—4	θ	$\frac{\mu}{\sigma_T} \frac{\partial \theta}{\partial x_j}$	$\alpha S (\theta_s - \theta)$

элемент полога; K_s — коэффициент ослабления излучения в пологе леса, выражение для которого получено на основе допущения о равномерном распределении и хаотичной ориентации элементов ЛГМ в пространстве; S_r — поверхность пламени; Fr , Re , Pe , Bo , Da_1 — числа Фруда, Рейнольдса, Пекле, Больцмана и Дамкеллера. В качестве характерных величин при обезразмеривании математической постановки задачи выбраны радиус очага, параметры невозмущенной атмосферы, скорость оттока газа из очага пожара (вернее, величина ей пропорциональная, так что безразмерная скорость оттока — параметр задачи — имеет значение, существенно меньше единицы).

Начальные и граничные условия:

$$\begin{aligned}
 t = 0: \quad u = v = \Theta = k = \varepsilon = 0, \quad \rho = 1, \quad \Phi_2 = \Phi_{2n}; \\
 t > 0: \quad x = 0, \quad y \leq \Delta_r: \quad u = u_r, \quad v = 0, \quad \Theta = \Theta_r; \\
 \quad \quad \quad y > \Delta_r: \quad u = v = \Theta = 0.
 \end{aligned}$$

Увеличение мощности очага низового пожара моделировалось зависимостями

$$u_r = u_m f(t), \quad \Theta_r = \Theta_m f(t),$$

где $f(t) = \exp(-1,45/t^{1,5})$. Нетрудно видеть, что при $t \approx 5,5$ значения u_r и Θ_r достигают 90% от своих максимальных величин. На границах $x = H$ и $y = R$ используются так называемые открытые граничные условия [10] для u , v , Θ , k и ε . Параметры турбулентности при $x = 0$ рассчитываются из закона стенки с учетом шероховатости [11].

Задача решалась численно методом контрольного объема [12], конкретная реализация которого для рассматриваемого типа задач изложена, например, в [13].

Таблица 2

Модель	F	c_F	S_F
3	Θ_s	$(\rho c)_\Sigma$	$\alpha S (\Theta - \Theta_s) - qW$
4	Θ_s	$(\rho c)_\Sigma$	$\alpha S (\Theta - \Theta_s) - qW + E$
2—4	Φ_2	ρ_2^0	$-W$

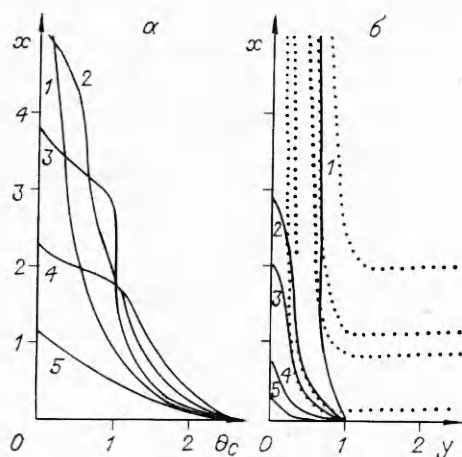


Рис. 2. Конвективная колонка в открытом пространстве.
 а) динамика профиля перегрева на оси ($t = 56$ — стационар (1), 12,5 (2), 10,5 (3), 8,2 (4) и 5,8 (5)); б) изотермы (—) и линии тока (· · ·) при установлении ($\Theta = 0,1$ (1), 0,33 (2), 0,5 (3), 1 (4) и 1,5 (5)).

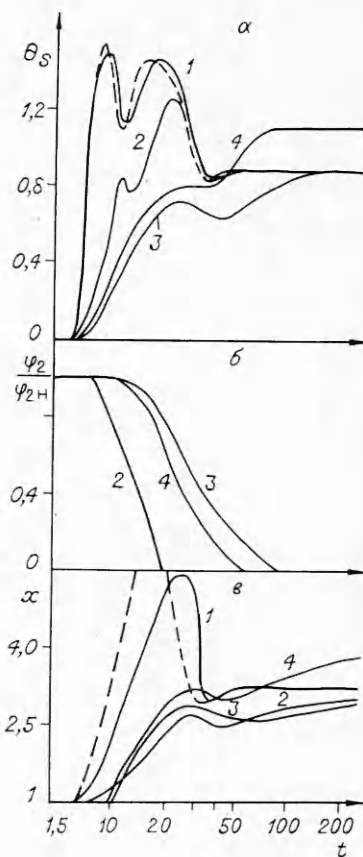


Рис. 3. Временные зависимости на оси колонки для различных моделей.
 а) перегрев к-фазы; б) относительная объемная доля влаги на нижней границе полога леса; в) положение изотермы $\Theta_s = 0,33$. Номер кривой совпадает с номером модели. Штриховые линии — колонка в открытом пространстве.

Расчеты проводили при следующих значениях параметров: $\Delta_r = 1$, $h_2 = 1$, $c_1 = 1,2$, $c_2 = 4,2$, $\rho_1^0 = 420$, $\rho_2^0 = 840$, $\varphi_{1н} = 2,4 \cdot 10^{-3}$, $\varphi_{2н} = 7,9 \cdot 10^{-4}$, $s = 12,7$, $c_d = 0,03$, $q = 8,3$, $\varepsilon_1 = 20,5$, $\varepsilon_r = 0,9$, $\varepsilon_s = 0,6$, $T_{п} = 4,2$, $u_m = 0,1$, $\Theta_m = 2,7$, $Fr = 1$, $Re = 2 \cdot 10^6$, $Re = 1,46 \cdot 10^5$, $Bo = 2,66 \cdot 10^3$, $Da_1 = 1,1 \cdot 10^4$.

Приведенные безразмерные значения параметров соответствуют типичным данным по теплофизическим и пирологическим свойствам ЛГМ и структурным характеристикам полога леса [1]. Переход низового пожара в верховой есть следствие взаимодействия конвективной колонки над очагом пожара с элементами ЛГМ в пологе леса. Рассмотрим результаты расчета параметров конвективной колонки в открытом пространстве (рис. 2) как отправную точку исследований. Представленные на рис. 3, а зависимости перегрева к-фазы полога леса от времени характеризуют тепловую нагрузку на элементы ЛГМ в самом опасном в смысле перехода месте — на нижней границе полога на оси симметрии потока. Общая для всех четырех моделей немонотонность зависимостей объясняется высоким темпом нарастания мощности очага низового пожара, который приводит в начальные моменты времени к образованию полуизолированных термиков непосредственно над очагом. Дальнейшее всплытие этих термиков приводит к немонотонности прогрева газовой среды в фиксированных сечениях по высоте, что, в свою очередь, влечет немонотонность прогрева к-фазы.

Отметим близость результатов, полученных по модели 1, с результатами задачи о колонке в открытом пространстве. Наличие влаги в пологе (см. рис. 3, а, кривая 2) резко замедляет процесс прогрева, сглаживает немонотонность и несколько уменьшает максимум перегрева. Это объясняется, с одной стороны, возросшей теплоемкостью среды, с другой — поглощением тепла при испарении влаги. Однако стационарное

значение перегрева достигается практически в то же время, что и для штриховой кривой и 1, т. е. динамика теплового нагружения полога в моделях 1 и 2 почти полностью определяется динамикой теплового состояния колонки. Однако простейшие оценки показывают, что характерное время прогрева элементов ЛГМ сравнимо с характерным гидродинамическим временем, поэтому эффект тепловой релаксации должен быть заметен. Последнее указывает на неадекватность моделей 1 и 2 исследуемому процессу перехода низового пожара в верховой.

Отмеченного недостатка лишены модели 3 и 4. Как показали расчеты, динамика перегрева газовой фазы в них практически такая же, как в задаче о конвективной колонке в открытом пространстве (отличие не более 7%). Что касается к-фазы, то соответствующие кривые (см. рис. 3, а) существенно иные. При этом учет излучения пламени (модель 4) приводит к увеличению до 25% стационарного значения температуры ЛГМ. Приведенные на рис. 3, б кривые сушки элементов ЛГМ в той же наиболее теплонапряженной точке хорошо коррелируют с кривыми нагрева полога (см. рис. 3, а). Более высокому темпу нагрева отвечают более высокие темпы сушки, которая к тому же происходит тем скорее, чем выше температура. Учет теплообмена между фазами (кривые 3, 4) приводит к увеличению в 3—4 раза времени высыхания ЛГМ по отношению к однотемпературной модели 2.

Следовательно, в приближении однотемпературности процесса темпы прогрева ЛГМ в глубину полога леса должны быть заниженными, поскольку в этом случае большая часть тепла тратится на испарение влаги в нижних слоях полога. Этот факт хорошо виден на рис. 3, в, где процесс прогрева ЛГМ отслеживается по положению изотермы $\Theta_s = 0,33$, соответствующей температуре кипения воды. Однако отличие от двухтемпературных постановок здесь не очень велико. Более существенно на динамику прогрева ЛГМ влияет количество влаги в пологе, которую необходимо испарить. Об этом говорит резкое отличие линии 1 от 2—4 на рис. 3, б, гораздо ближе она (как и на рис. 3, а) лежит к аналогичной кривой для колонки в открытом пространстве. При этом увеличение теплоемкости среды, связанное с присутствием к-фазы в пологе леса, приводит к замедлению темпов прогрева и уменьшению уровня максимального перегрева среды.

Была предпринята попытка дальнейшего усложнения модели путем учета влажности газовой фазы. Грубые оценки, проведенные в предположении мгновенного испарения влаги из элементов ЛГМ, указывали на возможность заметного изменения результатов. После соответствующих изменений модели 3 проведены расчеты, результаты которых, однако, с графической точностью совпали с результатами расчетов по модели 3.

На примере наиболее полной модели 4 рассмотрим подробнее процесс взаимодействия очага низового пожара с пологом леса. Сравнение рис. 4, а и 2, а показывает, что темпы продвижения тепловой волны в газовой фазе мало отличаются друг от друга, однако при наличии полога уменьшается наполненность профилей перегрева и на нестационарном участке появляется излом кривых на нижней границе полога. Стационарные распределения перегрева на оси симметрии практически совпадают. Следует заметить, что стационарное состояние в случае колонки в открытом пространстве наступает при $t = 50$, а при наличии полога (модель 4), если $t = 80$, при этом единственно заметно изменяющимся параметром оставалась объемная доля влаги ЛГМ, т. е. в строгом смысле здесь достигалось только квазистационарное состояние. Немонотонная (по времени) динамика профиля вертикальной компоненты скорости на оси (рис. 4, б) также объясняется образованием и последующим всплыванием полуизолированного термика в начальные моменты времени. Немонотонность в газовой фазе приводит к временной немонотонности прогрева к-фазы (рис. 4, в). Любопытно, что если в начальные моменты времени перегрев газовой фазы на нижней кромке полога превышал ана-

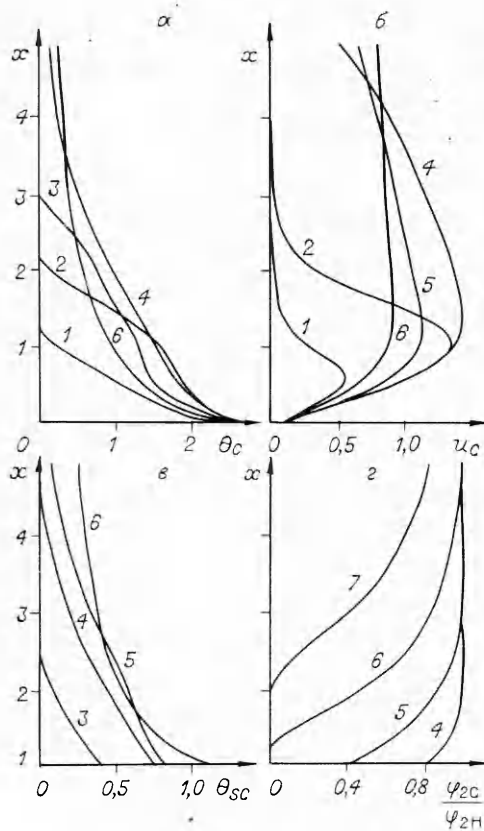


Рис. 4. Динамика профилей на оси колонки (модель 4).

а) перегрев газовой фазы; б) вертикальная скорость; в) перегрев к-фазы; г) объемная доля влаги (1-7: $t = 6,3; 8,3; 10; 16,7; 24,5; 86,1; 275$).

логичный перегрев к-фазы (кривые 3, 4), то в дальнейшем ситуация становится противоположной (кривые 6), что, очевидно, объясняется наличием излучения от пламени пожара. Медленнее всего испаряется влага (рис. 4, г), причем из-за уменьшения перегрева к-фазы по высоте темп продвижения фронта испарения падает (ср. интервал времени между кривыми 5-6 и 6-7).

Квазистационарная картина взаимодействия очага низового пожара с пологом (модель 4) представлена на рис. 5. При сравнении рис. 5, а с рис. 2, б видно, что тепловое ядро конвективной колонки в пологе превышает по своим размерам тепловое ядро чистой струи, поскольку элементы ЛГМ, получая дополнительное количество тепла за счет излучения, создают более нагретую среду, в которой горячая конвективная колонка меньше остывает. Периферийные линии тока на рис. 4, а устремляются вверх на большем удалении от очага низового пожара, поскольку нагретые излучением элементы ЛГМ отдают свое тепло подсосываемому окружающему воздуху. Сравнение изотерм газовой и к-фазы (см. рис. 4, а, б) показывает, что в ядре колонки газовая фаза отдает тепло конденсированной (изотермы 3, 4), а на периферии в нижних слоях полога леса — наоборот. Следует отметить, что в основном сушка и нагрев к-фазы происходят внутри вертикальной цилиндрической области, в основании которой находится очаг низового пожара (см. рис. 4, б).

В заключение приведем некоторые выводы. Описание динамики процесса теплового нагружения и сушки полога леса конвективным потоком от очага низового пожара требует привлечения сложных газодинамических моделей, особенно на нестационарном начальном участке, где определяющую роль в формировании течения играет развитие самого очага.

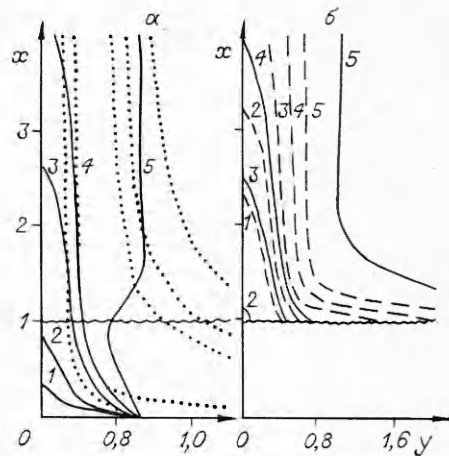


Рис. 5. Взаимодействие очага низового пожара с пологом леса (модель 4, $t \rightarrow \infty$).

а) изотермы в газовой фазе (сплошные), линии тока (пунктир); б) изотермы в к-фазе (сплошные), изолинии объемной доли влаги (штриховые). Изотермы: $\theta, \theta_s = 1,5$ (1), 1,0 (2), 0,5 (3), 0,33 (4), 0,1 (5), изолинии относительной объемной доли влаги: $\frac{\psi_2}{\psi_{2H}} = 0,1$ (1), 0,5 (2), 0,8 (3), 0,09 (4), 0,95 (5).

Неучет теплообмена между газовой и ж-фазами в пологе леса приводит к существенному (количественному и качественному) изменению результатов, в связи с чем для описания перехода необходимо привлечение уравнения баланса тепла для конденсированной фазы. Учет излучения пламени низового пожара приводит к увеличению темпа прогрева и испарения влаги из ЛГМ и тем самым уточняет временные оценки по переходу низового пожара в верховой. Дальнейшее изучение процесса перехода требует исследования роли основных определяющих параметров (задержание ЛГМ, высота нижней кромки полога, высота пламени и т. п.), которые в данной работе принимались неизменными.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гришин А. М. Математические модели лесных пожаров.— Томск: ТГУ, 1980.
2. Гришин А. М. // Механизм распространения лесных пожаров и вопросы внедрения результатов исследований в практику.— Томск: ТГУ, 1984.
3. Гришин А. М., Грузин А. Д., Зверев В. Г. ФГВ, 1985, 21, 1, 11.
4. Конев Э. В. Физические основы горения растительных материалов.— Новосибирск: Наука, 1977.
5. Исаков Р. В. // Лесные пожары и их последствия.— Красноярск: ИЛПД СО АН СССР, 1985.
6. Моршин В. Н. Автореф. дис. ... канд. техн. наук.— Л.: ЛПИ, 1986.
7. Роди В. // Методы расчета турбулентных течений.— М.: Мир, 1984.
8. Зигель Р., Хауэлл Дж. Теплообмен излучением.— М.: Мир, 1975.
9. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена.— М.: Атомиздат, 1979.
10. Orlandi I. J. Comp. Phys., 1976, 21, 3, 251.
11. Granville P. J. Ship. Research, 1985, 29, 4, 223.
12. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости.— М.: Энергоатомиздат, 1984.
13. Алексеев Н. Н., Фомин А. А. // Моделирование в механике.— Новосибирск, 1988.— Т. 1(18), № 5.

г. Кемерово

Поступила в редакцию 22/VI 1988,
после доработки — 27/XI 1988

УДК 546

А. С. Мукасян, Б. В. Степанов, Ю. А. Гальченко,
И. П. Боровинская

О МЕХАНИЗМЕ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ НИТРИДА КРЕМНИЯ ПРИ ГОРЕНИИ КРЕМНИЯ В АЗОТЕ

Горение неорганических соединений отличается высокими значениями и градиентами температур, давлений, малыми характерными временами [1]. Отсутствие удовлетворительных методов экспериментального изучения этих процессов сильно ограничивает возможности исследования механизма горения таких систем.

В настоящей работе сделана попытка анализа механизма физико-химических превращений в волне синтеза при горении кремния в азоте (система $\text{Si} + \text{N}_2$) по результатам последовательного изучения микроструктур исходной шихты, промежуточных и конечных продуктов синтеза. Показано, что на основе исследования эволюции микроструктуры и ее особенностей возможно построение физической модели этого явления.

Методика исследований

Характеристики исходных реагентов, способ подготовки шихты и параметры синтеза подробно описаны в [2]. Здесь лишь отметим, что промежуточные состояния реагирующей системы получались «закалкой» путем быстрого (~ 1 с) удаления газообразного реагента (N_2) из объема,

© 1990 Мукасян А. С., Степанов Б. В., Гальченко Ю. А., Боровинская И. П.