

МОДЕЛЬ ВОЗДУШНОЙ ГАЗИФИКАЦИИ ТВЕРДОГО ГОРЮЧЕГО В ФИЛЬТРАЦИОННОМ РЕЖИМЕ

Е. А. Салганский, В. П. Фурсов, С. В. Глазов, М. В. Салганская,
Г. Б. Манелис

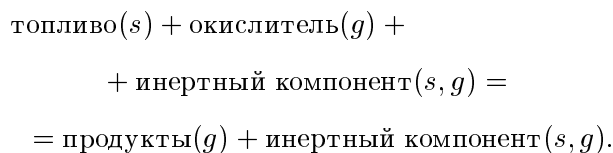
Институт проблем химической физики РАН, 142432 Черноголовка, sea@icp.ac.ru

Предложена двухтемпературная математическая модель стационарного процесса фильтрационного горения, учитывающая конечную длину реактора и зависимость теплоемкостей фаз от температуры и состава. Модель описывает процесс газификации твердого горючего в фильтрационном режиме. Представлены результаты расчетов для реакции газификации смеси углерод — инертный компонент. Определен интервал значений доли горючего компонента, в котором не реализуется ни чисто нормальная, ни чисто инверсная волна (для этого интервала предложен подход переходной волны). Показана конечность температуры горения во всем интервале доли горючего компонента.

Ключевые слова: фильтрационное горение (ФГ), газификация, модель фильтрационного горения, структура фильтрационного горения.

Фильтрационное горение (ФГ) — сложное макрокинетическое явление, включающее несколько одновременно протекающих элементарных процессов (химическое взаимодействие реагентов, подвод газообразного окислителя в зону реакции, теплообмен между реагентами и продуктами), взаимодействие которых и определяет характерные черты явления в целом. Распространение волны экзотермического превращения в смеси конденсированного топлива с инертным компонентом при фильтрации через нее окислителя приводит к так называемым «сверхадиабатическим разогревам» [1]. Они возникают в связи с тем, что выделяющееся тепло не уносится с продуктами реакции, а концентрируется в зоне горения, что позволяет существенно повысить температуру в ней. Такая важная особенность выгодно отличает процесс ФГ от других процессов горения. Спектр применений ФГ очень велик и включает природные (подземные пламена, тление), технологические (газификация угля, СВС) и промышленные (агломерация руд, переработка мусора) приложения [2, 3].

Для реакций горения характерны большие тепловые эффекты и высокие энергии активации. В результате гетерогенного взаимодействия твердого горючего с газообразным окислителем в волне ФГ могут образовываться как конденсированные, так и газообразные продукты. Брутто-схема реакции имеет вид:



Здесь инертный компонент (s — твердый, g — газообразный) обозначает не участвующие в реакциях окисления и газификации газы и конденсированные вещества, к ним можно отнести азот воздуха, золу твердого топлива и т. д.

Обычно этот процесс осуществляют в реакторах шахтного типа, в которых твердый горючий материал и газообразный окислитель движутся в противотоке навстречу друг другу.

К настоящему моменту подробно изучены одномерные стационарные модели ФГ [4–6]. В указанных работах рассматривался процесс фильтрационного горения в «бесконечном» реакторе. В ряде работ учитывались теплопотери через стенку реактора. В этом случае максимальные разогревы ограничены теплопотерями. При рассмотрении процесса в адиабатическом реакторе при точном равенстве значений параметра $\rho v c_p$ в твердой и газообразной фазах максимальная температура может уходить в бесконечность [6] (здесь ρ — плотность, v — скорость газа, c_p — теплоемкость). В работе [6] исследовался процесс газификации твердого топлива в «бесконечном» адиабатическом реакторе в предположении независимости теплоемкостей фаз от температуры и состава фаз.

При точном равенстве значений параметра фаз $\rho v c_p$ в точке перехода от нормальной к инверсной волне (точка инверсии) наблюдается эффект бесконечного роста температуры горения (точка равенства появляется вследствие пренебрежения зависимостью теплоемкости фаз от температуры и состава). В этом случае все тепло, выделяющееся в ходе процесса, остается в зоне реакции, неограниченно повышая температуру в ней (в случае «бесконечного» адиабатического реактора).

В настоящей работе представлена двухтемпературная математическая модель одномерного стационарного процесса ФГ, учитывающая конечность реактора (теплопотери через торцы реактора), а также зависимость теплоемкости фаз от температуры и состава. Предполагалось, что доминирующим процессом при формировании структуры волны горения является теплообмен между реагентами и продуктами. Для упрощения модели использовали предельно простую химическую схему. На основе модели проведены параметрические исследования влияния отдельных параметров задачи на процесс ФГ.

Предлагаемая двухтемпературная математическая модель стационарного процесса ФГ строится на следующих предположениях.

1. Толщину зоны химических реакций можно считать малой по сравнению с общей толщиной прогретого слоя. Поэтому профили температуры и максимальная температура вблизи зоны реакции условны, и для более детального анализа требуется включение в рассмотрение структуры зоны реакции.

2. Поскольку в случае достаточно большого реактора потери тепла через стенки реактора неизмеримо меньше характерной тепловой мощности, вырабатываемой в зоне горения, можно пренебречь теплопотерями через стенки реактора (идеальный адиабатический реактор). Учитываются только теплопотери через торцы реактора.

3. Перепад давления по реактору мал, и уравнения фильтрации и состояния «отщепляются» от системы. Перепад давления определяется параметрами заданного потока. При этом абсолютное значение давления можно считать заданным независимым параметром.

4. В случае достаточно медленной подачи окислителя или же при высокой температуре реагенты расходуются полностью, т. е. полностью выгорает горючее из твердой фазы и пол-

ностью расходуется окислитель, поступающий с газифицирующим агентом.

5. Считали, что в зоне реакции мгновенно устанавливается как термодинамическое равновесие между реагентами, так и тепловое равновесие между фазами. Таким образом, предполагали, что продукты из зоны реакции выходят при максимальной температуре (температуре горения).

Общая задача распадается на три случая.

1. Нормальная волна, когда зона реакции идет впереди волны прогрева. В этом случае окислитель и исходная смесь (шихта) поступают в реактор при начальной температуре T_0 , газообразные продукты реакции выходят из реактора также при T_0 , а инертный компонент, который остается за фронтом реакции, выгружается при некоторой температуре T_l . Эта температура выше T_0 , так как вследствие конечности реактора инертный компонент не успевает охладиться газообразным окислителем до температуры T_0 .

2. Инверсная волна, когда зона реакции идет позади волны прогрева. Окислитель и шихта так же, как и в первом случае, поступают в реактор при начальной температуре T_0 , однако инертный компонент, выгружаемый из реактора, успевает полностью отдать все запасенное тепло и охладиться до T_0 , а газообразные продукты выходят из реактора при температуре T_r .

3. Переходная волна, когда зона реакции находится внутри волны прогрева. В этом случае газообразный окислитель и шихта поступают в реактор при начальной температуре T_0 , однако газообразные продукты реакции выходят из реактора уже не при температуре T_0 (как это реализуется в нормальной волне), а при некоторой температуре T_r . Аналогично и для инертного компонента. Инертный компонент выгружается из реактора не при температуре T_0 (как в случае инверсной волны), а при температуре T_l . Это происходит потому, что волна прогрева распространяется в обе стороны от зоны реакции, и вследствие конечности реактора инертный компонент и продукты реакции не успевают охладиться до начальной температуры.

Рассматривали горение (газификацию) смеси углерод — инертный компонент в проточке с воздухом (предполагался следующий объемный состав воздуха: кислород — 21 %, азот — 79 %).

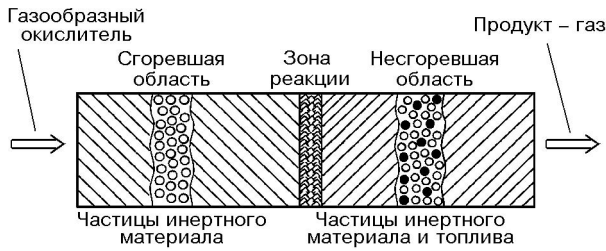


Рис. 1. Схема процесса

Предполагали, что твердая фаза состоит из несгорающей части (инертный компонент) и сгорающей части (горючее). В расчетах рассмотрены два варианта, в которых теплофизические характеристики инертного компонента принимались такими, как у графита или Al_2O_3 (корунда). Схема процесса представлена на рис. 1. Считали, что реакция идет до образования CO , что вполне справедливо для температур выше 800°C . Это означает, что в реакторе идет только реакция $2\text{C} + \text{O}_2 = 2\text{CO}$. Система координат связана с фронтом горения.

Система состоит из следующих уравнений:

$$iH_i(T_l) = -mH_m(T_0); \quad (1)$$

$$iH_i(T_l) + mH_m(T_r) + nH_n(T_r) = 0; \quad (1')$$

$$mH_m(T_r) + nH_n(T_r) = 0; \quad (1'')$$

$$\begin{aligned} xH_x(T_g^G) + nH_n(T_g^G) + cH_c(T_s^G) + iH_i(T_s^G) = \\ = iH_i(T^G) + mH_m(T^G) + nH_n(T^G); \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} G_g c_g \frac{dT_g}{dx} = -\alpha F (T_g - T_s), \\ G_s c_s \frac{dT_s}{dx} = \alpha F (T_s - T_g); \quad (3a) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} G'_g c'_g \frac{dT_g}{dx} = -\alpha F (T_g - T_s), \\ G'_s c'_s \frac{dT_s}{dx} = \alpha F (T_s - T_g); \quad (3b) \end{aligned}$$

$$c = i \frac{M_i}{M_c} \frac{a}{1-a}; \quad (4)$$

$$F = 6\Phi/r; \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{\lambda \text{Nu}}{2r}, \quad \text{Re} = \frac{(1-\Phi)\rho_g v 2r}{\mu}, \quad \text{Pr} = \frac{c_g \mu}{\lambda}; \quad (6)$$

$$\text{Nu} = \begin{cases} 2 + 0,106 \text{Re} \text{Pr}^{0,33}, & \text{Re} \leq 200, \\ 2,274 + 0,6 \text{Re}^{0,67} \text{Pr}^{0,33}, & \text{Re} > 200. \end{cases} \quad (7)$$

Здесь и далее $x, n, c, i, m, H_x, H_n, H_c, H_i, H_m$ — мольные расходы и энтальпии кислорода, азота, топлива, инертного компонента и монооксида углерода соответственно (энтальпии простых веществ равны нулю при комнатной (начальной) температуре T_0); T_g, T_s — температуры газовой и твердой фаз; T_g^G, T_s^G — температуры газовой и твердой фаз в зоне горения; c_g, c_s — удельные мольные теплоемкости газовой и твердой фаз; G_g, G_s — мольные расходы газовой и твердой фаз; α — коэффициент теплообмена; F — удельная площадь поверхности частиц (для определенности предполагали, что они имеют форму, близкую к кубической); a — доля топлива в шихте; M_i, M_c — молярные массы инертного компонента и топлива соответственно; x — текущая координата; Φ — коэффициент упаковки частиц; r — характерный размер частиц; ρ_g, μ, λ, v — плотность, динамическая вязкость, теплопроводность и скорость фильтрации воздуха; $\text{Re}, \text{Pr}, \text{Nu}$ — критерии подобия; L_l, L_r — координаты левого и правого торцов реактора.

Уравнения (1), (1'), (1'') — уравнения сохранения энергии системы для нормальной, переходной и инверсной волн; (2) — уравнение сохранения энтальпии на разрыве (в зоне реакции); (3а), (3б) — уравнения теплообмена между газовой и твердой фазами при $-L_l < x < 0$ и $0 < x < L_r$ соответственно (неучитывание второй производной температуры по координате дает ошибку менее 10 % для реактора длиной 1 м при скорости окислителя 0,01 м/с и характерном размере частиц 0,2 мм; в данной работе рассмотрены условия распространения волн горения, при которых характерные скорости фильтрации больше на порядок, а характерные размеры частиц — на два порядка (конвективный режим горения) [7]); (4) — соотношение, связывающее доли топлива и инертного компонента в исходной смеси; (5) — выражение для удельной площади поверхности частиц; (6) — замыкающие соотношения; (7) — эмпирическое выражение для числа Nu .

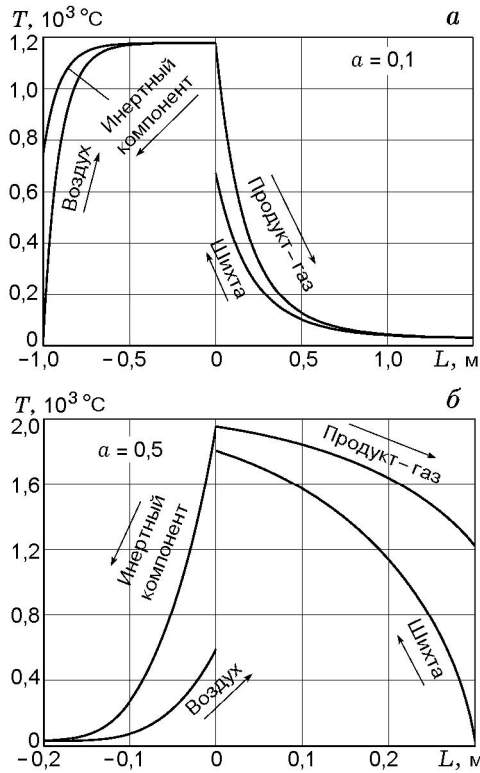


Рис. 2. Распределение температур компонентов по длине реактора:
 а — «бесконечный» реактор, нормальная волна,
 б — «короткий» реактор, инверсная волна

Систему решали модифицированным методом Эйлера со вторым порядком точности по координате.

Система замыкается следующими граничными условиями:

- 1) нормальная волна — $x = -L_l: T_g = T_0, T_s = T_l; x = L_r: T_s = T_0;$
- 2) инверсная волна — $x = -L_l: T_g = T_0; x = L_r: T_s = T_0, T_g = T_r;$
- 3) переходная волна — $x = -L_l: T_g = T_0, T_s = T_l; x = L_r: T_s = T_0, T_g = T_r.$

Расчеты проведены для следующих параметров системы. Диаметр реактора 0,16 м. Отметим, что уже для данного размера реактора по оценке теплопотери в окружающую среду составляют $\approx 10\%$ общей мощности реактора. Для промышленных установок, где диаметры реакторов намного больше, это значение существенно меньше. Характерный размер частиц принят равным 0,025 м. Коэффициент упаковки 0,55. Удельный расход воздуха, если не оговорено дополнительно, $0,11 \text{ м}^3/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$, что соответствует мольному расходу кислоро-

да 1 моль/ $(\text{с}\cdot\text{м}^2)$. Начальная температура $T_0 = 25^\circ\text{C}$. Термодинамические характеристики веществ взяты из справочника [8].

Заранее отметим, что расчеты проводились до значений температур не более 4000°C , так как при более высоких температурах даже такой термостойкий материал, как графит, не может находиться в твердой фазе, и дальнейшие расчеты не отражают действительности.

На рисунках используются следующие обозначения: T^G — температура горения; T_g^G — температура входящего в зону реакции воздуха; T_s^G — температура входящей в зону реакции шихты; T_l — температура выгружаемого из реактора инертного компонента; T_r — температура выходящего из реактора продукт-газа.

На рис. 2 показано типичное распределение температур по длине реактора в режимах нормальной и инверсной волн для «бесконечного» и «короткого» реакторов. Существует некоторая длина реактора, начиная с которой дальнейшее увеличение не приводит к заметным изменениям в зоне реакции. «Бесконечным» будем называть реактор, длины которого хватает для того, чтобы температуры газовой и твердой фаз сравнялись при теплообмене, «коротким» — реактор, длины которого недостаточно для того, чтобы температуры фаз сравнялись. На рис. 2,а видно, что существует область реактора, где температуры инертного компонента и воздуха сравнялись и

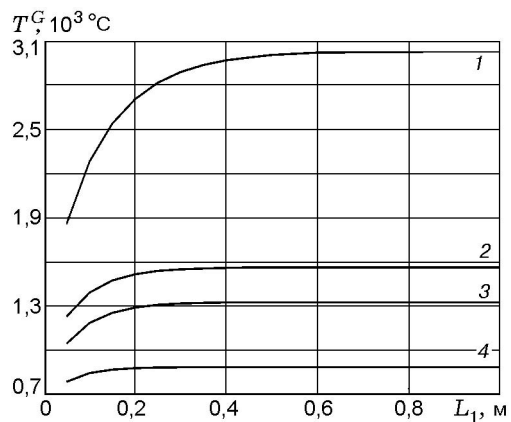


Рис. 3. Зависимость температуры горения от длины реактора:
 1, 2 — $a = 0,12$ (инертный компонент: 1 — корунд, 2 — графит), 3, 4 — $a = 0,8$ (3 — корунд, 4 — графит)

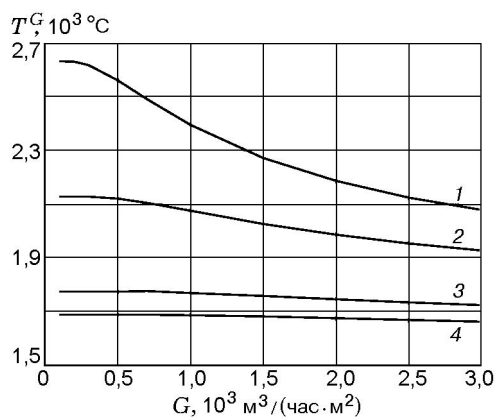


Рис. 4. Зависимость температуры горения от удельного расхода воздуха:

1, 2 — $a = 0,4$ (инертный компонент: 1 — графит, 2 — корунд), 3, 4 — $a = 0,65$ (3 — графит, 4 — корунд)

теплообмена не происходит (нормальная волна, «бесконечный» реактор). На рис. 2, б температура входящей в зону реакции шихты еще ниже температуры горения, при которой выходит из зоны продукт-газ (инверсная волна, «короткий» реактор).

На рис. 3 приведены распределения температуры горения по длине реактора в режиме нормальной волны (для инверсной волны характер зависимости аналогичный). Видно, что при удалении от торца реактора температура горения растет, но есть такое значение L^* , после которого температура горения остается постоянной. Видно, что в области переходной волны значение L^* больше, чем в области нормальной волны.

На рис. 4 показаны зависимости температуры горения от удельного расхода воздуха. Как в случае инверсной волны, так и в случае нормальной волны с увеличением расхода температура горения падает. Наибольшее влияние удельного расхода на температуру горения наблюдается в области переходной волны. Для очень малых и очень больших значений доли горючего компонента зависимостью температуры горения от расхода практически можно пренебречь. Из рисунков видно, что при уменьшении расхода температура горения растет до определенного значения, после которого дальнейшее уменьшение расхода не влияет на температуру горения.

На рис. 5 представлены профили температуры газовой и твердой фаз по длине реактора

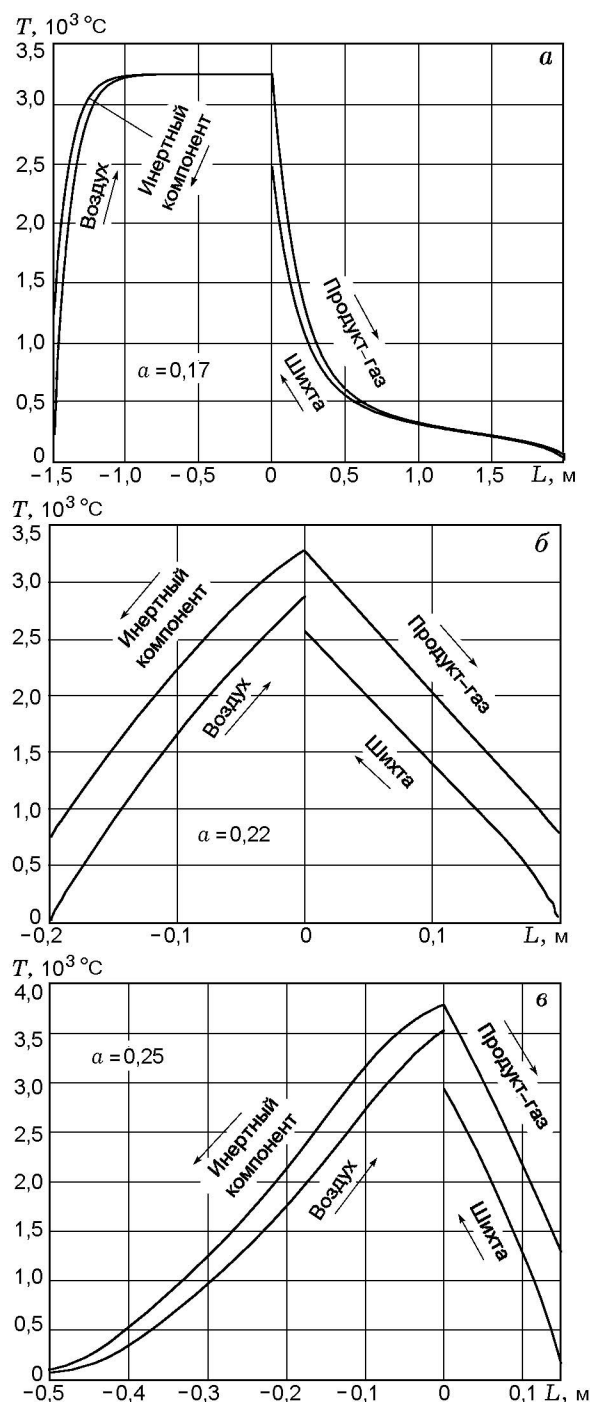


Рис. 5. Зарождение инверсной (а) и нормальной (в) волн:

б — переходная волна, «короткий» реактор

в режиме переходной волны. Поведение кривых температур отличается от соответствующих кривых, представленных на рис. 2. Из анализа данных рис. 5,а следует, что вторая производная от температуры между продукт-газом и шихтой меняет знак, т. е. в правой части реактора начинает зарождаться инверсная волна. Аналогичная картина наблюдается и на рис. 5,б, откуда следует, что и в левой части реактора начинает зарождаться нормальная волна. Данное обстоятельство указывает на то, что в реакторе складывается структура переходной волны. Таким образом, вместо точки инверсии появляется целая область значений доли горючего компонента, в которой вследствие зависимости термодинамических характеристик фаз от температуры необходимо учитывать вынос тепла одновременно и инертным компонентом, и продукт-газом. Рассмотрим теплообмен инертного компонента с газифицирующим агентом (рис. 5,а, $x < 0$). Волна конвективного теплообмена отстает от фронта реакции, и инертный компонент выгружается из реактора горячим (несет тепло). Если рассмотреть теплообмен между продукт-газом и исходной смесью (рис. 5,а, $x > 0$), видно, что в области высоких температур профиль волны соответствует случаю, когда скорость волны конвективного теплообмена меньше скорости фронта реакции, в то же время в области низких температур профиль волны соответствует случаю, когда скорость конвективной волны превышает скорость фронта, и продукт-газ выносит тепло из реактора (выходит горячим). Это происходит из-за зависимости теплоемкости фаз от температуры. В области высоких температур теплоемкость потока исходной смеси превышает теплоемкость потока продукт-газа, а в области низких температур — наоборот. В то же время отметим, что результирующий поток энтальпии остается постоянным во всей области реактора, где происходит теплообмен между продукт-газом и исходной смесью, и его величина положительная, т. е. происходит вынос тепла из реактора продукт-газом. Таким образом, все тепло, выделяющееся в зоне реакции в области переходных волн, выносится с обоих торцов реактора как инертным компонентом, так и продукт-газом одновременно, каким бы длинным ни был реактор.

Распределение температур фаз по длине реактора для переходной волны в случае «ко-

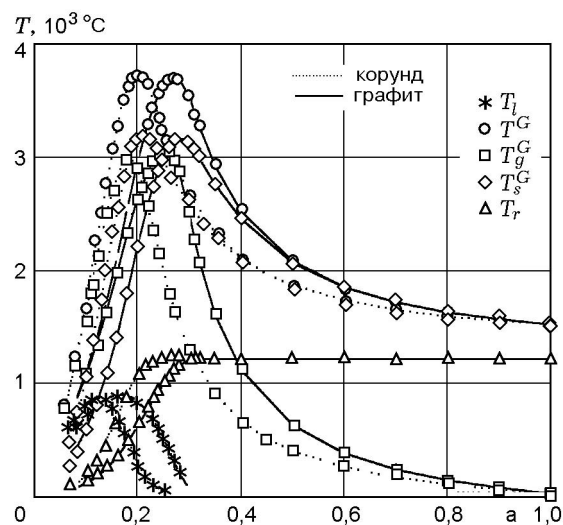


Рис. 6. Зависимости температур фаз от доли горючего:

$$L_l = 0,2 \text{ м}, L_r = 0,2 \text{ м}$$

роткого» реактора представлено на рис. 5,б. Расчеты выполнены для доли топлива, равной 0,22, и длины реактора 0,4 м (теплофизические свойства инертного компонента соответствуют графиту). В случае «короткого» реактора распределение температур симметрично.

На рис. 6 представлена зависимость температур фаз в характерных точках реактора от доли топлива в шихте. Видно, что значения максимумов кривых не зависят от теплофизических свойств инертного компонента. Также можно сделать вывод, что при увеличении теплоемкости инертного компонента область переходной волны сдвигается в сторону меньших значений доли топлива. Максимум температуры горения наблюдается в области переходной волны в случае близких значений температур, входящих в зону реакции реагентов.

В заключение отметим, что результаты, полученные на основе данной модели, качественно согласуются с представленными в работах [4–6]. Важнейшими результатами данной работы являются: (i) выявление интервала значений доли горючего компонента, где не реализуются ни чисто нормальная, ни чисто инверсная волны; для данного интервала сформулирован подход переходной волны; (ii) показана конечность температуры горения (даже для случая идеального адиабатического реактора) во всем интервале доли топлива в шихте. Учет зависимости теплоемкостей фаз от температуры и состава приводит к выносу тепла через

торцы реактора одновременно и инертным компонентом, и продукт-газом в области переходной волны, что исключает эффекты бесконечного роста температуры горения и трансформации конечной области переходной волны в точку перехода.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Алдушин А. П., Мержанов А. Г.** Теория фильтрационного горения: общие представления и состояние исследований // Распространение тепловых волн в гетерогенных средах. Новосибирск: Наука, 1988. С. 9–52.
2. **Богданов Н. И., Боксерман А. А., Ентов В. М. и др.** Термодинамика процесса внутрипластового горения как средства интенсификации добычи нефти // Там же. С. 233–246.
3. **Шейман А. Б., Сергеев А. И.** Экспериментальное исследование в слое нефтеносного песка // Тр. Ин-та нефти АН СССР. 1958. Т. 11. С. 228–239.
4. **Выжол Ю. А.** Сверхадиабатический режим фильтрационного горения гетерогенных систем: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Черноголовка: ОИХФ АН СССР, 1990.
5. **Алдушин А. П.** Теория фильтрационного горения: Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Черноголовка: ОИХФ АН СССР, 1981.
6. **Aldushin A. P., Rumanov I. E., Matkowsky B. J.** Maximal energy accumulation in a superadiabatic filtration combustion wave // Combust. Flame. 1999. V. 118. P. 76–90.
7. **Алдушин А. П.** Теплопроводностный и конвективный режимы горения пористых систем при фильтрации теплоносителя // Физика горения и взрыва. 1990. Т. 26, № 2. С. 60–68.
8. **Термодинамические свойства индивидуальных веществ** / Под ред. В. П. Глушко и др. 3-е изд. М.: Наука, 1978.

Поступила в редакцию 14/XII 2001 г.
