

# ТИПЫ СТРУКТУР ТЕПЛОВОЙ ВОЛНЫ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ ПРИ ГАЗИФИКАЦИИ ТВЕРДОГО ГОРЮЧЕГО

Е.А. Салганский, А.Ю. Зайченко, Д.Н. Подлесный, М.В. Цветков

Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН,  
пр. Академика Семенова, 1, Черноголовка, РФ

## Аннотация

Предложена двухтемпературная математическая модель стационарного процесса фильтрационного горения, учитывающая конечный размер реактора и зависимость теплоемкостей от температуры и состава фаз. Модель описывает газификацию твердого горючего в фильтрационном режиме. Представлены результаты расчетов для газификации смеси углерода с инертным материалом. Определен интервал значений содержания горючего компонента, в котором не реализуется ни нормальная, ни инверсная тепловая структура волны горения. Показан предел температуры горения во всем интервале доли горючего компонента.

*Ключевые слова:* фильтрационное горение, твердое топливо, тепловая структура, моделирование.

## 1. Введение

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 [1-4]. Теоретический анализ сложного явления предполагает упрощенное схематическое описание отдельных стадий. При осуществлении экзотермической реакции газообразного окислителя с твердым горючим в фильтрационном режиме формируется пространственная структура, в которой толщина зоны реакции становится малой по сравнению с общей толщиной прогретого слоя, и решающую роль играет межфазный теплообмен [5,6].

Для реакций горения характерны большие тепловые эффекты и высокие энергии активации. В результате гетерогенного взаимодействия твердого горючего с окислителем в

волне ФГ могут образовываться как конденсированные, так и газообразные продукты [7,8]. Брутто-схема реакции имеет вид (s – твердое; g – газообразное, инерт – инертный материал):

Топливо(s)+окислитель(g)+инерт(s,g) = продукты(g)+инерт(s,g)

Обычно этот процесс осуществляется в реакторах шахтного типа, в которых твердый горючий материал и газообразный окислитель движутся противотоком навстречу друг другу. В этом случае достаточно просто организовать процесс так, чтобы выделяющееся тепло не уносилось с продуктами реакции, а концентрировалось в зоне горения, что позволяет существенно повысить температуру в ней. Такая важная особенность делает данный процесс весьма привлекательным для переработки или уничтожения различных видов отходов.

К настоящему моменту подробно были рассмотрены имеющиеся одномерные стационарные модели ФГ. Данные модели оставляют открытым вопрос, связанный с конечными

размерами реактора. Поэтому целью работы является математическое описание ФГ твердого топлива при учете конечного размера реактора и зависимости теплоемкостей от температуры и состава фаз.

## 2. Математическая модель

Предлагаемая двухтемпературная математическая модель стационарного процесса ФГ учитывает конечность реактора, а также зависимость теплоемкостей фаз от температуры и состава. Она строится на следующих предположениях. Течение газа считается безнапорным, т.е. перепад давления мал и уравнения фильтрации и состояния исключаются из системы. Теплотери в окружающую среду считаются пренебрежимо малыми и не учитываются, что справедливо для реакторов больших диаметров. Продукты из зоны реакции выходят при температуре горения, т.е. теплообмен в зоне происходит с бесконечной скоростью.

Общая задача распадается на три случая [9,10]:

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  $T_{if}^i$ . Эта температура выше  $T_0$ , т.к., вследствие конечности реактора, инерт не успевает охладиться газообразным окислителем до  $T_0$ .

2. *Переходная волна*, когда зона реакции находится посреди 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 начальной температуре  $T_0$  (как это реализуется в нормальной волне), а при некоторой температуре  $T_{pr}^g$ . Аналогично для инерта. Инерт выгружается из реактора не при температуре  $T_0$  (как в случае инверсной волны), а при температуре  $T_{if}^i$ . Это происходит именно потому, что волна прогрева распространяется в обе стороны от зоны реакции, и, вследствие конечности реактора, ни инерт, ни продукты реакции не успевают охладиться до начальной температуры.

3. *Инверсная волна*, когда зона реакции идет позади волны прогрева. В этом случае, также, окислитель и шихта поступают в реактор при начальной температуре  $T_0$ , однако, инерт, вы-

гружаемый из реактора, успевает полностью отдать все запасенное тепло и охладиться до  $T_0$ , а газообразные продукты выходят из реактора при температуре  $T_{pr}^g$ .

Рассмотрим газификацию смеси углерод – инертный материал в противотоке с воздухом (будем считать, что состав воздуха в объемных процентах: кислород – 21%, азот – 79%). Характеристики инерта брались как у графита. Схема процесса представлена на рис.1.

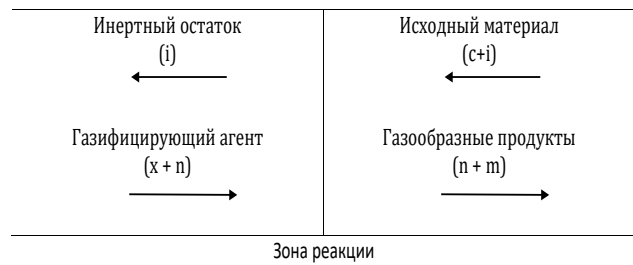
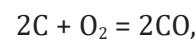


Рис. 1. Схема процесса ФГ твердого топлива.

В реакторе происходит следующая реакция:



т.е. считаем, что реакция идет до образования CO, что справедливо для температур выше 1000 °C [11]. Система координат связана с фронтом горения.

$$iH_i(T_{if}^i) = -mH_m(T_0) \quad (1)$$

$$iH_i(T_{if}^i) + mH_m(T_{pr}^g) + nH_n(T_{pr}^g) = 0 \quad (1')$$

$$mH_m(T_{pr}^g) + nH_n(T_{pr}^g) = 0 \quad (1'')$$

$$\frac{xH_x(T_v^g) + nH_n(T_v^g) + cH_c(T_s^g) + iH_i(T_s^g)}{iH_i(T^g) + mH_m(T^g) + nH_n(T^g)} = \quad (2)$$

$$\begin{cases} gc_g \frac{dT_g}{dx} = -\alpha F(T_g - T_s) \\ sc_s \frac{dT_s}{dx} = \alpha F(T_s - T_g) \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} g'c'_g \frac{dT_g}{dx} = -\alpha F(T_g - T_s) \\ s'c'_s \frac{dT_s}{dx} = \alpha F(T_s - T_g) \end{cases} \quad (4)$$

$$c = i \frac{M_i}{M_c} \frac{a}{1-a} \quad (5)$$

$$F = \frac{6\Phi}{r} \quad (6)$$

Здесь:  $x, n, c, i, m, H_x, H_n, H_c, H_v, H_m$  – мольные расходы и энтальпии кислорода, азота, топлива, инерта и монооксида углерода, соответственно. Причем, энтальпии простых веществ равны нулю при начальной температуре  $T_0$ ;  $T_g, T_s$  – температура газовой и твердой фаз;  $T_v^g, T_s^g$  – температура газовой и твердой фаз в зоне горения.  $c_g, c_s$  – удельные мольные теплоемкости газовой и твердой фаз;  $g, s$  – мольные расходы газовой и твердой фаз.  $a$  – коэффициент теплообмена;  $F$  – удельная поверхность частиц (для определенности предполагается, что они имеют кубическую форму);  $a$  – доля топлива в шихте.  $M_v, M_c$  – молярная масса инертного материала и топлива.  $L_{lf}, L_{pr}$  – координата левого и правого торцов реактора;  $x$  – текущая координата.  $\Phi$  – коэффициент упаковки частиц;  $r$  – размер частиц.

(1), (1'), (1'') – уравнения сохранения энергии системы, для нормальной, переходной и инверсной волн соответственно [12]; (2) – уравнение сохранения энтальпии на разрыве (в зоне реакции) [13]; (3а), (3б) – уравнения теплообмена между газовой и твердой фазами, при  $-L_{lf} < x < 0$  и  $0 < x < L_{pr}$  соответственно (во всех трех случаях аналогичны); (4) – соотношение, связывающее доли топлива и инертного материала в исходной смеси; (5) – выражение для удельной поверхности частиц [14].

Система решалась методом Эйлера со вторым порядком точности по координате [15].

Система замыкается следующими граничными условиями:

1) *нормальная волна* –  $x = -L_{lf}$ :  $T_g = T_0$ ;  $x = L_{pr}$ :  $T_s = T_0$ ;

2) *переходная волна* –  $x = -L_{lf}$ :  $T_g = T_0, T_s = T_{lf}^i$ ;  $x = L_{pr}$ :  $T_s = T_0, T_g = T_{pr}^g$ ;

3) *инверсная волна* –  $x = -L_{lf}$ :  $T_g = T_0$ ;  $x = L_{pr}$ :  $T_s = T_0$ .

Расчеты проводились для следующих значений параметров системы. Диаметр реактора равнялся 160 мм. Отметим, что уже для данного размера реактора теплотери в окружающую среду составляли порядка 10% от общей мощности реактора. Для производственных установок, где диаметры реакторов намного больше, эта цифра значительно меньше. Характерный размер частиц принимался рав-

ным 25 мм. Коэффициент упаковки брался 0.55. Коэффициент теплообмена  $a$  равнялся 20 Дж/(с\*м<sup>2</sup>\*°С). Удельный расход воздуха, если не оговорено дополнительно, равнялся 384,2 м<sup>3</sup>/(час\*м<sup>2</sup>), что соответствует мольному расходу кислорода в 1 моль/(с м<sup>2</sup>). За начальную температуру брали температуру 25 °С.

### 3. Результаты и обсуждение

Заранее отметим, что расчеты проводились до значений температур порядка 4000 °С, т.к. при более высоких температурах даже такой термостойкий материал как графит не может находиться в твердой фазе, и дальнейшие расчеты не отражают действительность.

На рисунках введены следующие обозначения:  $T_G$  – температура горения;  $T_g$  – температура входящего в зону реакции воздуха;  $T_s$  – температура входящей в зону реакции шихты;  $T_{lf}^i$  – температура выгружаемого из реактора инерта;  $T_{pr}^g$  – температура выходящего из реактора продукт – газа.

На рис. 2 и 3 показано типичное распределение температур по длине реактора для нормальной и инверсной волн, для ‘бесконечного’ и ‘короткого’ реакторов [16]. Для каждого набора начальных параметров существует своя длина реактора, дальнейшее увеличение которой не приводит к температурным изменениям в реакторе. ‘Бесконечным’ будем называть такой реактор, длины которого хватает, чтобы температуры газовой и твердой фаз сравнялись при теплообмене [17] перед зоной горения ( $x = 0$ ). На рис. 2 температуры

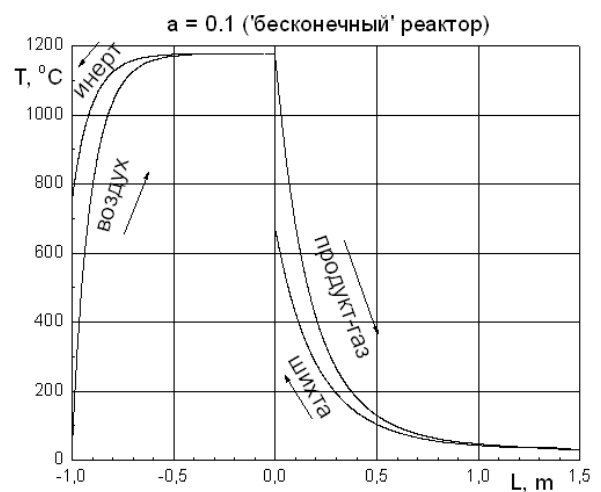


Рис. 2. Распределение температур по длине реактора для нормальной волны.

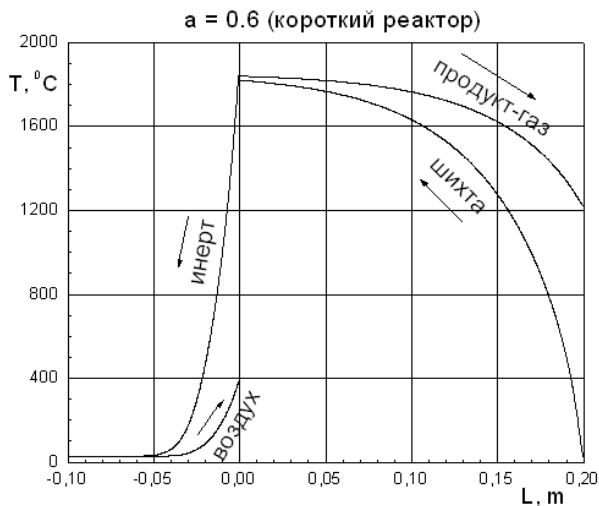


Рис. 3. Распределение температур по длине реактора для инверсной волны.

инерта и воздуха равны при  $x = 0$ . 'Коротким' будем называть реактор, длины которого не хватает, чтобы температуры газовой и твердой фаз сравнялись при теплообмене. На рис. 3 температуры продукт-газа и шихты не равны при  $x = 0$ .

На рис. 4 показано распределение температур фаз по длине реактора для переходной волны. В бесконечном реакторе температуры инерта и воздуха сравнялись перед зоной горения. Профили температуры продукт-газа и шихты имеют горизонтальную полку в интервале 200-400 °C. В правом верхнем углу представлены аналогичные зависимости, но для короткого реактора. Видно, что в этом случае

распределение температур фаз носит симметричный характер.

На рис. 5 приведены кривые поведения температуры горения в зависимости от удаления зоны реакции от торцов реактора, для нормальной волны (для остальных случаев аналогично). Видно, что при удалении зоны от торца температура горения растет, но есть такое значение  $L^*$ , после которого температура горения остается постоянной. То есть существует такое значение длины реактора, которое с точки зрения температурных профилей, аналогично бесконечному реактору.

На рис. 6 показаны те же зависимости, но от удельного расхода воздуха. С увеличением расхода воздуха температура горения падает [18]. Чем ближе подбираемся к инверсности волны, тем сильнее влияние расхода на температуру горения. Для очень малых и очень больших значений доли горючего компонента зависимость 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. 7 представлена зависимость температур фаз в характерных точках реактора от доли топлива в шихте. Максимум температуры горения наблюдается в случае близких значений температур, входящих в зону реакции реагентов. Он наблюдается на границе между переходной и инверсной волнами [19,20].

Из расчетов получен интервал значений

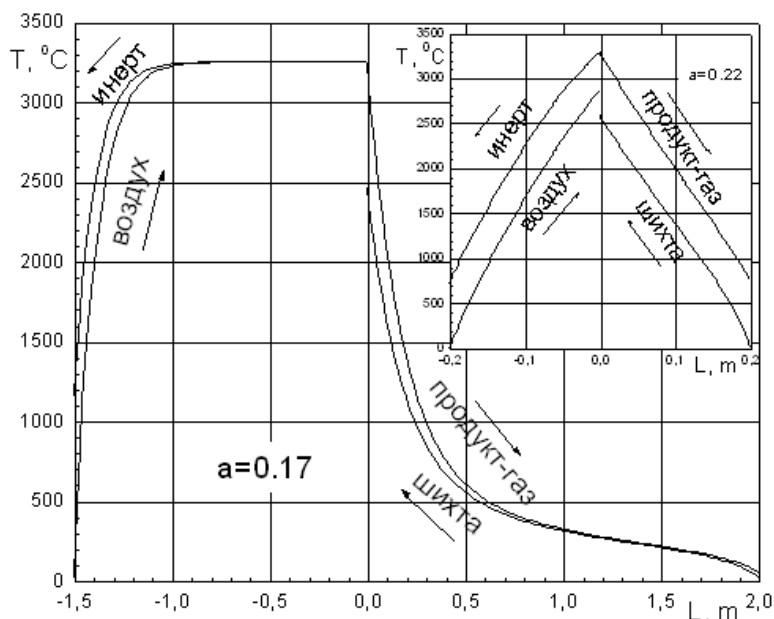


Рис. 4. Распределение температур фаз по длине реактора для переходной волны.

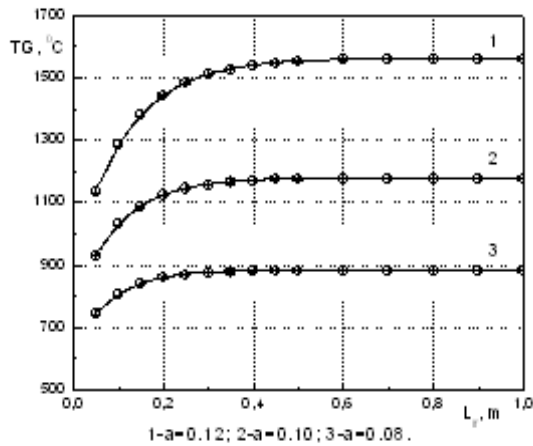


Рис. 5. Зависимость температуры горения от удаления зоны реакции от торцов для нормальной волны.

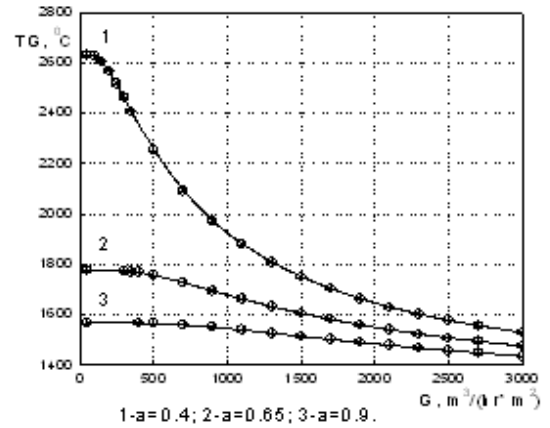


Рис. 6. Зависимость температуры горения от расхода воздуха для нормальной волны.

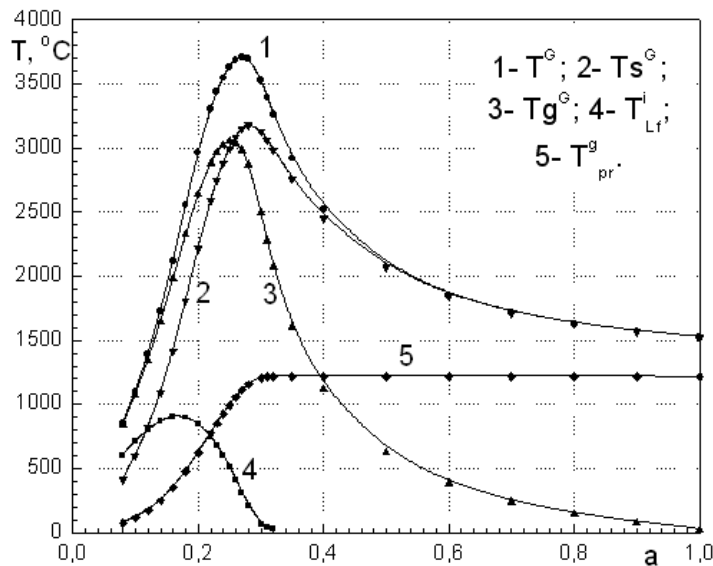


Рис. 7. Зависимость температуры от доли топлива в шихте.

доли горючего компонента от 0.12 до 0.27, в котором не реализуется ни чисто нормальная, ни чисто инверсная волна. В данном интервале нужно учитывать вынос тепла из реактора и инертном и продукт-газом одновременно. В этом случае, для адиабатических установок мы не получим рост температуры горения до бесконечности в случае равенства теплоемкостей фаз.

#### 4. Заключение

В данной работе представлена математическая модель газификации твердого горючего в фильтрационном режиме, учитывающая конечный размер реактора и зависимость теплоемкостей от температуры и от состава

фаз. Представлены результаты расчетов для газификации смеси углерода с инертным материалом. Из расчетов получен интервал значений доли горючего компонента от 0.12 до 0.27, в котором не реализуется ни чисто нормальная, ни чисто инверсная волна. В данном интервале нужно учитывать вынос тепла из реактора и инертном и продукт-газом одновременно. Показано, что для очень малых и очень больших значений доли горючего компонента зависимостью температуры горения от расхода практически можно пренебречь. Результаты, полученные на основе данной модели, качественно согласуются с результатами, представленными в других работах. Однако, из сравнения профиля температуры горения от доли горючего компонента, выяснилось,

что количественное согласие результатов наблюдается для реакторов большой длины. Для коротких реакторов температуры получаются значительно ниже.

### Благодарность

Исследование выполнено в рамках проекта РНФ №21-79-20008. Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова.

### Литература

- [1]. Алдушин А.П., Сеплярский Б.С. Распространение волны экзотермической реакции в пористой среде при продуве газа // Доклады АН СССР. – 1978. – Т.241, №1. – С.72-75.
- [2]. Алдушин А.П., Сеплярский Б.С. Инверсия структуры волны горения в пористой среде при продуве газа // Доклады АН СССР. – 1979. – Т.249, №3. – С.585-589.
- [3]. Рабинович О.С., Гуревич И.Г. Закономерности распространения встречной стационарной волны экзотермической реакции при вынужденной фильтрации газа-окислителя через пористый материал // Инженерно-физический журнал. – 1983. – Т.44, №1. – С.75-80.
- [4]. Бабкин В.С., Вежба И., Карим Г.А. Явление концентрации энергии в волнах горения // Физика горения и взрыва. – 2002. – Т.38, №1. – С.3-11.
- [5]. Алдушин А.П., Мержанов А.Г. Теория фильтрационного горения: общие представления и состояние исследований / Распространение тепловых волн в гетерогенных средах. Новосибирск: Наука, СО, 1988. – С.9-52.
- [6]. Манелис Г.Б. Сверхадиабатика // Природа. – 1996. – №3-4. – С.43.
- [7]. Богданов Н.И., Боксерман А.А., Ентов В.М., Либрович В.Б., Степанов В.П. Термодинамика процесса внутрислового горения как средства интенсификации добычи нефти / Распространение тепловых волн в гетерогенных средах. Новосибирск: Наука, СО, 1988. – С.233-246.
- [8]. Шейман А.Б., Сергеев А.И. Экспериментальное исследование в слое нефтеносного песка // Труды института нефти АН СССР. – 1958. – Т.11. – С.228-239.
- [9]. Манелис Г.Б., Салганский Е.А., Фурсов В.П., Глазов С.В., Салганская М.В. Численное исследование газификации углерода в волне фильтрационного горения // Наука-Производству. – 2001. – Т.46, №8. – С.28-32.
- [10]. Салганский Е.А., Фурсов В.П., Глазов С.В., Салганская М.В., Манелис Г.Б. Модель паровоздушной газификации твердого горючего в фильтрационном режиме // Физика горения и взрыва. – 2003. – Т.39, №1. – С.44-50.
- [11]. Канторович Б.В. Введение в теорию горения и газификации твердого топлива. Москва: Metallurgizdat, 1960. – 355 с.
- [12]. Глушко В.П. изд. третье. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Москва: Наука, 1978. – 496 с.
- [13]. Алдушин А.П. Теплопроводностный и конвективный режимы горения пористых систем при фильтрации теплоносителя // Физика горения и взрыва. – 1990. – Т.26, №2. – С.60-68.
- [14]. Wakao N., Kaguil S. Heat and mass transfer in porous media. Gordon and Breach Science publ., Switzerland, 1982.
- [15]. Калиткин Н.Н. Численные методы. М.: Наука, 1978. – 512 с.
- [16]. Aldushin A.P., Rumanov I.E., Matkowsky B.J. Maximal Energy Accumulation in a Superadiabatic Filtration Combustion Wave // Comb. and flame. – 1999. – Vol.118. – P.76-90.
- [17]. Глазов С.В. Экспериментальное и теоретическое исследование процессов газификации низкокалорийных горючих материалов в сверхадиабатическом режиме // Научный отчет. ИПХФ РАН, Черноголовка, 1999.
- [18]. Вещунов И.С. Экспериментальное исследование фильтрационного горения составов с активированным углем при различном соотношении компонентов. Дипломная работа. ИПХФ РАН, Черноголовка, 2002.
- [19]. Алдушин А.П. Теория фильтрационного горения. Дис. д-ра физ.-мат. наук. Черноголовка, ОИХФ АН СССР, 1981 г.
- [20]. Выжол Ю.А. Сверхадиабатический режим фильтрационного горения гетерогенных систем. Дис. канд. физ.-мат. наук. Черноголовка, ОИХФ АН СССР, 1990 г.

### References

- [1]. Aldushin AP, Seplyarsky BS (1978) Reports of the USSR Academy of Sciences [Doklady AN SSSR]. 241(1):72-75. (in Russian)
- [2]. Aldushin AP, Seplyarsky BS (1979) Reports of the USSR Academy of Sciences [Doklady AN SSSR]. 249(3):585-589. (in Russian)
- [3]. Rabinovich OS, Gurevich IG (1983) Engineering and Physics Journal [Inzhenerno-fizicheskij

- zhurnal]. 44(1):75-80. (in Russian)
- [4]. Babkin VS, Vezhba I, Karim GA (2002) Combustion, explosion, and shock waves 38(1):3-11.
- [5]. Aldushin AP, Merzhanov AG (1988) Propagation of heat waves in heterogeneous media [Rasprostranenie teplovyh voln v geterogennyh sredah]. Nauka, Siberian Branch, Novosibirsk, Russia. P.9-52. (in Russian)
- [6]. Manelis GB (1996) Nature [Priroda] 3-4:43. (in Russian)
- [7]. Bogdanov NI, Boxerman AA, Gorenje VM, Librovich VB, Stepanov VP (1988) Propagation of heat waves in heterogeneous media [Rasprostranenie teplovyh voln v geterogennyh sredah]. Nauka, Siberian Branch, Novosibirsk, Russia. P.233-246. (in Russian)
- [8]. Sheiman AB, Sergeev AI (1958) Proceedings of the Institute of Petroleum of the USSR Academy of Sciences [Trudy instituta nefti AN SSSR]. 11:228-239. (in Russian)
- [9]. Manelis GB, Salgansky EA, Fursov VP, Glazov SV, Salganskaya MV (2001) Science-Production [Nauka-Proizvodstvu] 46(8):28-32. (in Russian)
- [10]. Salgansky EA, Fursov VP, Glazov SV, Salganskaya MV, Manelis GB (2003) Combustion, explosion, and shock waves 39(1):44-50.
- [11]. Kantorovich BV (1960) Introduction to the theory of gorenje and gasification of solid fuels [Vvedenie v teoriyu gorenija i gazifikacii tverdogo topliva]. Metallurgizdat, Moscow, Russia. P.355. (in Russian)
- [12]. Glushko VP, third edition (1978) Thermodynamic properties of individual substances [Termodinamicheskie svojstva individual'nyh veshchestv]. Nauka, Moscow, Russia. P.496. (in Russian)
- [13]. Aldushin AP (1990) Combustion, explosion, and shock waves 26(2):60-68.
- [14]. Wakao N, Kaguil S (1982) Heat and mass transfer in porous media. Gordon and Breach Science publ., Switzerland.
- [15]. Kalitkin NN (1978) Numerical methods [CHislennye metody] Nauka, Moscow, Russia. P.512. (in Russian)
- [16]. Aldushin AP, Rumanov IE, Matkowsky BJ (1999) Combustion and flame. 118:76-90.
- [17]. Glazov SV (1999) Experimental and theoretical study of gasification processes of low-calorie combustible materials in the superadiabatic mode. Scientific report. [Eksperimental'noe i teoreticheskoe issledovanie processov gazifikacii nizkokalorijnyh goryuchih materialov v sverhadiabaticeskom rezhime. Nauchnyj otchet] IPHF RAS, Chernogolovka, Russia. (in Russian)
- [18]. Veshchunov IS (2002) Experimental study of filtration gorenje compositions with activated carbon at different ratios of components. Graduate work. [Eksperimental'noe issledovanie fil'tracionnogo gorenija sostavov s aktivirovannym uglem pri razlichnom sootnoshenii komponentov. Diplomnaya rabota]. IPHF RAS, Chernogolovka, Russia. (in Russian)
- [19]. Aldushin AP (1981) Theory of filtration combustion [Teoriya fil'tracionnogo gorenija]. Dis. Doctor of Physical and Mathematical Sciences. OIHF of the USSR Academy of Sciences, Chernogolovka, Russia. (in Russian)
- [20]. Vyzhol YuA (1990) Superadiabatic mode of filtration combustion of heterogeneous systems [Sverhadiabaticeskij rezhim fil'tracionnogo gorenija geterogennyh sistem] Dis. Candidate of Physical and Mathematical Sciences. OIHF of the USSR Academy of Sciences, Chernogolovka, Russia.

### Type of structure of thermal wave of filtration combustion during gasification of solid fuel

E.A. Salgansky, A.Yu. Zaichenko, D.N. Podlesny, M.V. Tsvetkov

Federal Research Center for Problems of Chemical Physics and Medical Chemistry of the Russian Academy of Sciences, 1, Academician Semenov ave., Chernogolovka, Russia

### Abstract

A two-temperature mathematical model is proposed for the stationary process of filtration combustion, which takes into account the finite size of the reactor and the dependence of heat capacities on temperature and phase composition. The model describes the gasification of solid fuel in the filtration regime. The results of calculations for the gasification of a mixture of carbon with an inert material are presented. The range of values of the content of the combustible component is determined, in which neither the normal nor the inverse thermal structure of the combustion wave is realized. The combustion temperature limit is shown in the entire range of the combustible component fraction.

*Key words:* filtration combustion, solid fuel, thermal structure, modeling.

### **Қатты отынды газдандыру кезіндегі фильтрациялық жанудың термиялық толқынының құрылымының түрі**

Е.А. Салганский, А.Ю. Зайченко, Д.Н. Подлесный, М.В. Цветков

Ресей Ғылым академиясының Химиялық физика және медициналық химия мәселелерінің Федералдық ғылыми орталығы, Академик Семенов даңғ., 1, Черноголовка, Ресей

#### **Аннотация**

Фильтрациялық жанудың стационарлық процесі үшін реактордың шекті өлшемін және жылу сыйымдылықтарының температура

мен фазалық құрамға тәуелділігін ескеретін екі температуралық математикалық модель ұсынылған. Модель сүзу режимінде қатты отынды газдандыруды сипаттайды. Көміртек қоспасын инертті материалмен газдандыру бойынша есептердің нәтижелері берілген. Жану толқынының қалыпты да, кері жылулық құрылымы да орындалмайтын жанғыш құрамдас бөлігінің мәндерінің диапазоны анықталады. Жану температурасының шегі жанғыш компонент фракциясының барлық диапазонында көрсетілген.

*Кілт сөздер:* фильтрациялық жану, қатты отын, жылу құрылымы, модельдеу.